



HAL
open science

Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du Haut Sebou (Maroc)

Abdelghani Qadem

► **To cite this version:**

Abdelghani Qadem. Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du Haut Sebou (Maroc). Géographie. Université de Lorraine, 2015. Français. NNT : 2015LORR0263 . tel-01754630

HAL Id: tel-01754630

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754630v1>

Submitted on 30 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Thèse de Doctorat de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdelah
et l'Université de Lorraine



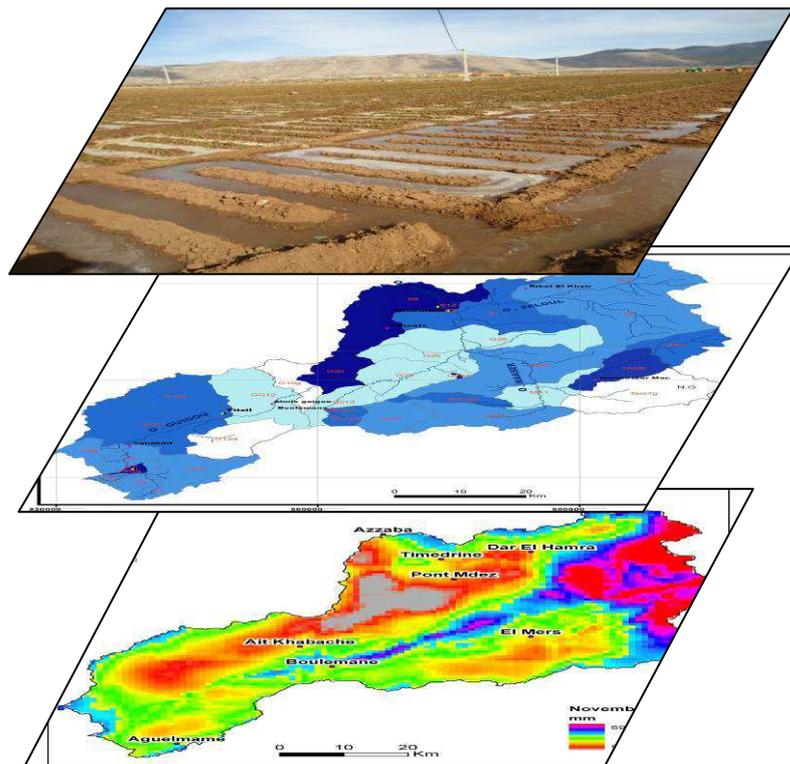
CED : LAPATER (LAGEA) Saïs-Fès

Ed : Fernand Braudel (LOTERR) Metz

Discipline : Géographie

QUANTIFICATION, MODELISATION ET GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT SEBOU (MAROC).

Abdelghani QADEM



Membres de Jury :

M. Brahim AKDIM
M. Emmanuel GILLE
M. Sébastien LEBAUT
M. Alain DEVOS
Mme. Rachida NAFAA
M. Mhamed AMYAY
M. Mohamed LAAOUANE

Université Sidi Mohamed Ben Abdelah (Fès)
Université de Lorraine (Metz)
Université de Lorraine (Metz)
Université de Reims (Reims)
Université Hassan II (Mohemmadia)
Université Sidi Mohamed Ben Abdelah (Fès)
Université Sidi Mohamed Ben Abdelah (Fès)

Co-directeur
Co-directeur
Membre
Membre
Présidente
Membre
Membre

Le 04 décembre 2015

Sommaire

Introduction générale	30
Première partie : Problématique et contexte physique de l'étude	32
Chapitre 1 : Problématique, objectifs, méthode et approche.....	34
Chapitre 2 : Contexte physiographique du bassin versant.....	44
Chapitre 3 : Les apports au système hydrologique.....	70
Deuxième partie : Hydrologie analytique du Haut Sebou	104
Chapitre 4 : Les données hydrologiques.....	105
Chapitre 5 : Les phases hydrologiques.....	123
Chapitre 6 : L'organisation spatiale des écoulements en basses eaux.....	157
Troisième partie : Le contexte humain, occupation du sol et gestion des ressources en eau	180
Chapitre 7 : Contexte humain et anthropisation.....	183
Chapitre 8 : L'irrigation au Maroc et dans le Moyen Atlas / historique de la gestion.....	202
Chapitre 9 : Analyse de l'enquête.....	225
Quatrième partie : La modélisation	251
Chapitre 10 : Présentation du modèle et quantification des variables et paramètres.....	253
Chapitre 11 : Mise en œuvre, résultats et validation de la modélisation hydrologique.....	265
Conclusion générale	276

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	30
Première partie : Problématique et contexte physique de l'étude	
Introduction de la 1ère partie	33
Chapitre 1 : Problématique, objectifs, méthode et approche	
Introduction	34
I-Cadre de la thèse	35
II- Etat de l'art	36
III- Problématique de l'étude.....	38
IV- Objectifs, méthode et approche	40
1- Les objectifs de cette étude.....	40
2- Méthodes et approches.....	40
V- La collecte de l'information existante : bibliographie, données.....	41
VI- La production de données : mesures hydrométriques et enquête	41
VII- Organisation et traitements des données.....	42
VIII- Modélisation et bilans	43
Conclusion	43
Chapitre 2 : Contexte physiographique du bassin versant	
Introduction	45
I- Situation géographique et contexte du bassin versant du Haut Sebou à l'échelle du Maroc	45
II-Le bassin versant	47
1-Les caractères morphométriques.....	47
1-1- Forme et surface	47
1-2-Hypsométrie et système de pente du bassin versant du Haut Sebou	48
1-3-Les pentes du bassin	51
III- Contexte géologique et perméabilité des formations.....	52
1-Le contexte général	52
2-Litho-stratigraphie et perméabilité des formations géologiques.....	54
VI-Le réseau hydrographique	61

1- Le cours principal.....	62
2- La densité de drainage.....	63
3- Les profils en long.....	66
Conclusion	68

Chapitre 3 : Les apports au système hydrologique

Introduction	71
I- Le contexte climatique	71
II- Les précipitations.....	73
1- Les données pluviométriques.....	73
1-1-La critique des données.....	75
1-2-Le comblement des lacunes.....	77
2- La variabilité temporelle des précipitations	77
2-1- Le régime des précipitations	78
2-1.1- La variabilité annuelle	78
2-1.2-Analyse fréquentielle des précipitations annuelles	81
3- La spatialisation des pluies dans le bassin versant du Haut Sebou	82
3-1- Définition de régions pluviométriques homogènes : méthode VR.....	83
3-2- Définition et extraction des variables prédictives.....	86
3-3- Définition du modèle.....	86
3-4- Résultats en interannuels : chronique 1974/2010.....	88
3-5- Les résultats du modèle à l'échelle annuelle et mensuelle.....	90
3.6- La méthode de "l'inverse des distances".....	90
III-L'évapotranspiration potentielle et réelle.....	93
1-L'ETP et l'ETR dérivées de l'imagerie satellitale	95
2-La spatialisation de l'ETP	97
3-L'ETR	99
4-Estimation de la pluie efficace sur le bassin versant.....	100
Conclusion	102

Conclusion de la 1ère partie.....	103
-----------------------------------	-----

Deuxième partie : Hydrologie analytique du Haut Sebou

Introduction de la 2ème partie.....	105
-------------------------------------	-----

Chapitre 4 : Les données hydrologiques

Introduction	106
I-Présentation des stations hydrométriques	107
1- Disponibilité et critiques des données	111
II-Caractéristiques globales des débits aux stations.....	112
1-Modules et débits moyens annuels.....	112
1-1-Modules.....	112
1-2-CUSUM des débits.....	115
2-Etude statistique des Q annuels (1958-59/2009-10)	116
3-Les régimes hydrologiques	118
4-Synthèse des écoulements à l'échelle moyenne annuelle.....	119
Conclusion	121

Chapitre 5 : Les phases hydrologiques

Introduction.....	123
I-Les crues	123
1- Intérêt des recherches sur les crues.....	124
2-Les débits de crue annuels	124
3-Les écoulements rapides de crue	126
4-Résultats	127
4-1-Les coefficients d'écoulement rapide de crue (ERC).....	127
4-2-Les volumes d'eau annuels des phases de crue.....	128
II-Les étiages et le tarissement du Haut Sebou	131

1-Les étiages	131
1-1-Problématique.....	131
1-2-Définition.....	131
2-Définitions statistiques des débits d'étiages	132
3-Caractéristiques des étiages du Haut Sebou	133
3-1- Les QMNA : l'étiage au pas de temps mensuel.....	133
3-1-1- Analyse fréquentielle des débits d'étiages (QMNA)	135
a- Ajustement des QMNA	135
3-2- Les VCNd : l'étiage au pas de temps journalier.....	137
4-Tarissement des débits des cours d'eau	139
4-1-L'extraction des épisodes de tarissement.....	140
4-2-L'exploitation des phases de tarissement.....	146
4-2-1- Les courbes maîtresses de tarissement (Master Recession Curve)	148
a-La méthode de corrélation	148
b-Matching Strip method (M. S. M).....	151
4-3-Longues phases de tarissement observés et tarissement moyen	155
Conclusion.....	156

Chapitre 6 : L'organisation spatiale des écoulements en basses eaux

Introduction	158
I-Problématique et démarche utilisée	158
1- problématique	158
2- Démarche utilisée	159
2-1- Les points de mesure.....	160
2-2- Les techniques de Mesure du débit	161
II-Les résultats.....	165
1-Le coefficient de tarissement	165

2- Les profils hydrologiques et les cartes de rendements	166
2-1- Les profils hydrologiques.....	166
2-2- La cartographie des débits	167
3- Interprétation des résultats.....	168
Conclusion	179
Conclusion de la 2ème partie	181

Troisième partie : Le contexte humain, occupation du sol et gestion des ressources en eau

Introduction de la 3ème partie	182
--------------------------------------	-----

Chapitre 7 : Contexte humain et anthropisation

Introduction	184
I- Les caractéristiques anthropiques.....	184
1- Aperçu historique sur l'installation humaine et l'anthropisation dans le Haut Sebou	184
1-1- Anthropisation : Définition, processus et conséquences.....	184
2- Bref rappel historique.....	185
II- Les caractéristiques démographiques	186
1- Le cadre administratif.....	186
2- L'évolution démographique	187
III- L'occupation des sols.....	191
1- Les terrains de cultures	195
2- La végétation naturelle.....	195
3- Les terrains incultes et les parcours	199
Conclusion.....	201

Chapitre 8 : L'irrigation au Maroc et dans le Moyen Atlas / historique de la gestion

Introduction	204
I- Historique de la politique d'irrigation marocaine	204
1- Evolution de la politique d'irrigation durant la période du protectorat	204

2-Evolution de la politique d'irrigation après l'indépendance	205
3-Le Plan Maroc Vert	207
3-1- Place de l'irrigation dans la stratégie du Plan Maroc Vert	208
3-2- Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI).....	208
4-L'irrigation au Moyen-Atlas	209
4-1- Le cas du périmètre de Skoura	210
5- Le cadre institutionnel de la gestion de l'eau au Maroc	212
5-1 Historique des textes relatifs à la gestion de l'eau.....	213
5-2- La loi sur l'eau (loi n° 10-95).....	213
5-3 Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC)	214
II-Les mutations récentes au sein de la région d'étude.....	215
1-Mutations générales.....	215
1-1 Le système foncier	216
1-2 L'élevage	216
1-3 Les dynamiques agraires	216
3-L'évolution de l'utilisation agricole dans le Haut Sebou	217
III-Le système d'irrigation	218
1-La structure du réseau d'irrigation	218
1-1 Les seguias	218
1-2 Les barrages.....	219
2- Périmètres irrigués	220
2-1 Périmètre de Guigou-Timahdite.....	220
2-2 Périmètres de Skoura et d'Immouzar Marmoucha	222
3- Le fonctionnement de l'irrigation traditionnel.....	222
Conclusion	224

Chapitre 9 : Analyse de l'enquête

Introduction	226
I-Présentation de la méthodologie de l'enquête.....	226
1- La méthodologie	226
2- Dépouillement et analyse des données	227
II- Résultats	227
1- La structure foncière	227
2- L'irrigation avec les eaux superficielles	228
2-1 Nature et entretien de la Seguia ou (mesref).....	228
2-2 Cycle d'irrigation.....	231
2-3 L'importance des cultures pratiquées dans le Haut Sebou	233
2-4 Les conflits autour de l'eau.....	235
3- L'irrigation avec ressources souterraines.....	236
3-1 Caractéristiques techniques des ouvrages	237
3-2 Domaines d'utilisation.....	240
4- L'utilisation pour l'agriculture	240
4-1- La superficie irriguée par les eaux du puits.....	240
4-2- Le fonctionnement de l'exploitation.....	241
5- Réaménagement et modernisation.....	246
5-1- Remplacement des cultures moins consommatrices en eau.....	246
5-2 La technique du goutte à goutte	247
Conclusiion	248
Conclusion de la 3ème partie.....	250

Quatrième partie : La modélisation

Introduction de la 4ème partie.....	252
-------------------------------------	-----

Chapitre 10 : Présentation du modèle et quantification des variables et paramètres

Introduction	253
--------------------	-----

I-La modélisation Hydrologique : considérations théoriques.....	254
1-Définitions	254
2-Intérêt et enjeux de la modélisation	255
3-Les types de modèles hydrologiques	256
4-Choix d'un modèle.....	257
II-Etapes de la mise en œuvre d'un modèle hydrologique.....	257
1-Préparation des données d'entrée.....	258
2- Calage du modèle	259
3- Validation du modèle	259
III-Les modèles retenus pour le Haut Sebou.....	260
1-Justification et choix des modèles.....	260
2-Structure du modèle ORCHY	261
3-Structure du modèle GR2M.....	263
Conclusion	264
 Chapitre 11 : Mise en œuvre, résultats et validation de la modélisation hydrologique	
Introduction.....	266
I- Les jeux de données et paramètres de calage disponibles	266
1-Les données d'entrée du modèle : les variables climatiques.....	266
2-Les paramètres de calage	266
II- Les critères de validation	267
III-Mise en œuvre et résultats du modèle GR2M	268
1-Les enseignements de la modélisation GR2M.....	270
IV-Mise en œuvre et résultats du modèle ORCHY.....	270
V-Les résultats.....	272
Conclusion.....	274
Conclusion de la 4ème partie.....	275
Conclusion générale	276

TABLE DES TABLEAUX

Chapitre 2

Tableau 2.1: Caractéristiques morphométriques du bassin versant du Haut Sebou	48
Tableau 2.2: Répartition des altitudes dans le bassin versant du Haut Sebou.....	50
Tableau 2.3: Répartition des grandes formations lithologiques et de leurs perméabilités dans le bassin du Haut Sebou	58
Tableau 2.4 : Densité de drainage dans le bassin versant du Haut Sebou	64

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Localisation et date de mise en service des 26 stations retenues.....	74
Tableau 3.2 : Caractéristiques statistiques des 3 Stations	79
Tableau 3.3 : Résultat du découpage des données de pluies annuelles de la station de Fès par la méthode de segmentation de Hubert.	80
Tableau 3.4 : Précipitations annuelles fréquentielles pour la période (1974-2010), loi Ln-Normale ...	82
Tableau 3.5 : Coefficients de corrélation obtenue par la méthode de vecteur régional	84
Tableau 3.6 : Les stations thermométriques utilisées	95
Tableau 3.7 : Valeurs d'ETP et d'ETR pour les 3 stations.....	96
Tableau 3.8 : Évaporation annuelle au niveau de 6 lacs (Loup, 1957).....	97
Tableau 3.9 : Valeurs de l'ETR Modis annuelle (mm) pour les bassins versants du Haut Sebou	99

Chapitre 4

Tableau 4.1 : Les caractéristiques des stations hydrométriques.....	109
Tableau 4.2 : Statistiques des 5 Stations implantées dans le bassin versant du Haut Sebou	114
Tableau 4.3 : Découpage de la chronique des débits d'Azzaba 1957/58 – 2009/2010 en périodes homogènes	116
Tableau 4.4 : Fréquence et durée de retour des modules sur le Haut Sebou.....	117
Tableau 4.5 : Données du bilan hydrologique pour deux années particulières	119
Tableau 4.6 : Volumes du débit et de la différence avec le débit théorique	120

Chapitre 5

Tableau 5.1 : Débits de crues fréquents aux stations du Haut Sebou	125
Tableau 5.2 : Moyenne des coefficients d'ERC mensuels et écart type	127
Tableau 5.3 : Caractéristiques de l'écoulement pour les épisodes de crue aux stations.....	128
Tableau 5.4 : Contribution minimum et maximum des crues au volume annuel du débit.....	130
Tableau 5.5 : Caractéristiques de l'écoulement pour les périodes sèches et humides.....	130
Tableau 5.6 : Découpage de la chronique des QMNA d'Azzaba (1958-2009) et Pont Mdez (1959-2009).....	135
Tableau 5.7 : Débits d'étiage fréquents aux stations du Haut Sebou.....	137
Tableau 5.8 : VCN fréquents du Haut Sebou à la station d'Azzaba (lois de Goodrich avec troncatures)	138
Tableau 5.9 : Valeurs du mode Fréchet pour toute la chronique et les séries humide et sèche	144
Tableau 5.10 : Le débit Q0 maximum d'après le mode Fréchet pour toutes les stations.....	145
Tableau 5.11 : Valeurs de Q0 Max d'après les deux méthodes d'extraction des épisodes de tarissements.	145
Tableau 5.12 : Nombre et durée moyenne de phases extraites sur les hydrogrammes.....	146
Tableau 5.13 : Statistiques descriptives des coefficients de Maillet déterminés directement des épisodes de tarissement.....	147
Tableau 5.14 : Coefficient de tarissement aux 4 stations par la méthode des corrélations	151
Tableau 5.15 : Coefficients de tarissement d'après les deux méthodes	154
Tableau 5.16 : Equation du tarissement : "matching strip method"	155

Chapitre 6

Tableau 6.1 : Nombre de points jaugés par campagne	160
Tableau 6.2 : Résultats des campagnes de jaugeages aux point G26 et MA9 en l/s.....	171
Tableau 6.3 : Contribution en (%) du bassin Mâassèr et Zloul à l'écoulement du Haut Sebou	172

Chapitre 7

Tableau 7.1 : Evolution démographique de la population dans les communes de Haut Sebou	189
--	-----

Chapitre 8

Tableau 8.1 : Superficies irrigables et équipées dans la zone d'action des Offices de mise en valeur agricole marocains..... 206

Tableau 8.2 : Evolution des volumes d'eau mobilisables par l'agriculture en % à l'échelle nationale. 207

Tableau 8.3 : Exemple de la répartition de la S.A.U, ainsi que les rendements et les productions réalisés au niveau de la cuvette d'Immouzar 222

Chapitre 11

Tableau 11.1 : Valeurs du coefficient de vidange mensuel de nappe en pourcent 267

Tableau 11.2 : Principaux paramètres de calages et résultats du bilan hydrologique aux stations.... 272

TABLE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1.1 : Démarche de thèse.....	40
-------------------------------------	----

Chapitre 2

Figure 2.1 : Apport des eaux superficielles par bassin versant au Maroc .	45
Figure 2.2 : Localisation Sebou/haut Sebou sur google earth	46
Figure 2.3 : Hypsométrie dans le bassin du Haut Sebou	49
Figure 2.4 : Courbe hypsométrique du bassin du Haut Sebou	50
Figure 2.5 : Répartition hypsométrique du bassin du Haut Sebou.....	50
Figure 2.6 : Carte de pente du bassin versant	51
Figure 2.7 : Coupe géologique du Moyen Atlas septentrional	53
Figure 2.8 : Carte structurale du bassin versant du Haut Sebou.	54
Figure 2.9 : Log stratigraphique du bassin versant du Haut Sebou	56
Figure 2.10: Carte du réseau hydrographique.....	63
Figure 2.11: Profil en long de l'oued Guigou-Sebou.....	66
Figure 2.12 : Profil en long de l'oued Maâsser	67
Figure 2.13 : Profil en long de l'oued Zloul.....	68

Chapitre 3

Figure 3.1 : Pluviométrie moyenne annuelle du Maroc (source : Météo Maroc).....	72
Figure 3.2 : Courbes ombrothermiques représentatives de 3 ambiances climatiques du bassin versant du Haut Sebou (source : Service géologique du Maroc, 1977)	73
Figure 3.3 : Localisation des stations pluviométriques.....	75
Figure 3.4 : Méthode du simple cumul.....	76
Figure 3.5 : Méthode du double cumul	76
Figure 3.6 : Exemple de corrélation mensuelle	77
Figure 3.7 : Précipitations annuelles moyennes à la station de Mdez	78

Figure 3.8 : CUSUM des précipitations à la station de Fès et moyenne pour les 3 périodes homogènes	80
Figure 3.9 : Ajustement statistique des pluies annuelles à la station de Boulemane	81
Figure 3.10 : Résultat de la méthode du Vecteur Régional	85
Figure 3.11 : Fenêtres utilisées pour le calcul des paramètres par station	86
Figure 3.12 : Exemples de coefficient de corrélation R^2 en fonction du nombre de composantes	88
Figure 3.13 : Exemple pour l'année hydrologique 1982/1983	88
Figure 3.14 : Les précipitations moyennes annuelles 1974-2010 (mm) par le modèle PLS	89
Figure 3.15 : Distribution du pourcentage de variance expliquée par le modèle PLS à l'échelle annuelle et mensuelle	90
Figure 3.16 : Relation entre les pluies calculées par la méthode "inverse des distances au carré" et celle du "cokrigage co-localisé en paquet"	91
Figure 3.17 : Carte des précipitations moyennes annuelles sur la période 1974-2010	92
Figure 3.18 : Variations annuelles de l'ETP "Turc" pour la période (1974-2003)	95
Figure 3.19 : ETP Modis/ETP Turc pour les 3 stations de 2000 à 2003.....	96
Figure 3.20 : Relation ETP/altitude	98
Figure 3.21 : Carte de l'ETP Turc dans le bassin du Haut Sebou (1974/75 – 2002/2003	98
Figure 3.22 : ETR Modis (1/10 mm) du bassin du Haut Sebou	100
Figure 3.23 : Relation précipitations / ETR Modis annuelles.....	101
Figure 3.24 : Relation précipitations / précipitations efficaces sur le bassin du Haut Sebou à Azzaba.	101

Chapitre 4

Figure 4.1 : Localisation des stations hydrométriques	110
Figure 4.2: Chronogramme des débits disponibles	111
Figure 4.3 : Modules cumulés aux stations d'Azzaba, de Pont de Mdez (1958/59 à 2009/10) et d'El Mers (1982/83 à 2009/10).....	111
Figure 4.4 : Débits moyens annuels et module à la station d'Azzaba	113
Figure 4.5 : Relation pluie/débits aux stations	114
Figure 4.6 : CUSUM des modules annuels à la station d'Azzaba (1957-1958/2009-2010)	115

Figure 4.7 : Distribution des modules aux stations d’Azzaba et Pont Mdez (1958-59/2009-10).....	116
Figure 4.8 : Ajustement des modules à la station d’Azzaba	117
Figure 4.9 : Régimes hydrologiques aux stations en débits bruts	118
Figure 4.10 : Coefficients mensuels de débits aux stations.....	119
Figure 4.11 : Synthèse des écoulements annuels moyens dans le bassin du Haut Sebou (en hm3) ..	121

Chapitre 5

Figure 5.1 : Ajustement des débits de crue	125
Figure 5.2 : Décomposition d’un hydrogramme de crue.....	126
Figure 5.3 : Volume total annuel écoulé et contribution des crues	129
Figure 5.4 : Volume total annuel écoulé et contribution des crues	130
Figure 5.5 : variabilité des QMNA du Haut Sebou à Azzaba et Pont de Mdez	134
Figure 5.6 : Ajustements des QMNA à un échantillon de valeurs annuelles avec troncature = 0 (Azzaba ; 1957-2010)	136
Figure 5.7 : Ajustement statistique des débits d’été à la station d’Azzaba	136
Figure 5.8 : variations des VCN selon les variables retenues	137
Figure 5.9 : Corrélation entre les VCN (Azzaba).....	138
Figure 5.10 : Corrélation entre les VCN 30 et les QMNA (Azzaba)	138
Figure 5.11 : Identification de la phase de tarissement d’un cours d'eau.....	139
Figure 5.12 : Exemple d'hydrogramme et hyétogramme pour la station d'Ait Khabbach pour l’année 1974-1975 et celle d’El Mers pour l’année 1988-1989.	141
Figure 5.13 : Distribution des Qmj pour le mois de septembre de la période 1958-1994 à la station d’Azzaba.....	142
Figure 5.14 : Courbe LogQmj/LogNj% pour les Qmj des mois de septembre de la période 1958-1980 à la station d’Azzaba	143
Figure 5.15 : Valeurs du débit de nappe maximum d’après la méthode « Gamez- Zumstein »	144
Figure 5.16 : Le débit Q0 maximum d’après le mode Fréchet à Azzaba.	144
Figure 5.17 : Le débit Q0 maximum d’après le mode Fréchet pour les stations du bassin.....	145
Figure 5.18 : Coefficient de tarissement moyen d’après la méthode de corrélation.....	149

Figure 5.19 : Ajustement de la courbe à une courbe exponentielle et détermination du coefficient de tarissement de maillet	150
Figure 5.20 : Tarissement pour les deux périodes pluviométriques homogènes à la station d'Azzaba	151
Figure 5.21 : Exemple de mise en correspondance des débits Q_0 et Q_t de différentes phases de tarissement pour la station d'Azzaba	152
Figure 5.22 : L'exemple du calcul du coefficient de tarissement par la méthode M.S.M. pour le mois de juillet à la station d'Azzaba	152
Figure 5.23 : Coefficient de tarissement moyen d'après la méthode de "matching strip"	153
Figure 5.24 : Coefficient de tarissement moyen mensuel d'après la méthode de "matching strip"	154
Figure 5.25: Courbe retenue et courbe théorique des grandes phases à la station d'Azzaba.....	155

Chapitre 6

Figure 6.1 : Localisation des bassins unitaires jaugés communs aux 8 compagnes.....	161
Figure 6.2 : profil de la section mouillée de point de jaugeage S8.....	163
Figure 6.3 : Exemple de construction d'une courbe de tarissement.....	166
Figure 6.4 : Profil hydrologique du cours d'eau principal (Guigou-Sebou).....	167
Figure 6.5 : Exemple de calcul du rendement hydrologique	168
Figure 6.6 : Rendement hydrologique par bassin unitaire pour mai 1996.....	174
Figure 6.7 : Rendement hydrologique par bassin unitaire pour mai 2011.....	175
Figure 6.7 : Rendement hydrologique par bassin unitaire pour septembre 2011.....	176
Figure 6.7 : Comparaison des rendements hydrologiques entre deux compagnes de mesures.....	177

Chapitre 7

Figure 7.1 : Evolution de la population du Haut Sebou	188
Figure 7.2 : Carte de taux d'accroissement annuel moyen de la population des communes situées dans le Haut Sebou et des communes limitrophes (RGPH : 1982, 1994).....	190
Figure 7.3 : Carte de taux d'accroissement annuel moyen de la population des communes situées dans le Haut Sebou et des communes limitrophes (RGPH : 1994, 2004).....	191
Figure 7.4 : Le pouvoir répartiteur du sol	192

Figure 7. 5 : Carte d'occupation des sols.	193
Figure 7. 6 : Répartition des différents variables d'occupation du sol.	194
Figure 7. 7 : Répartition du territoire entre différents usages.	194
Figure 7. 8 : Relation entre le coefficient d'écoulement et le taux de couvert forestier, d'après Mad'ud (1992) in Consandey (1999).	196
Figure 7. 9 : Groupement végétaux dans le bassin du Haut Sebou.	198

Chapitre 8

Figure 8. 1 : Situation des barrages et le périmètre de Skoura.	212
Figure 8. 2 : Localisation ancienne du périmètre agraire.	221
Figure 8. 3 : Localisation actuelle du périmètre agraire.	221

Chapitre 9

Figure 9.1 : La superficie des exploitations irriguées dans le Haut Sebou.	227
Figure 9.2 : Extension future de la superficie irriguée.	227
Figure 9.3 : Nature du réseau des seguias dans le bassin du Haut Sebou.	229
Figure 9.4 : Contribution des seguias en terre à la perte de l'eau.	229
Figure 9.5 : Mode d'entretien du réseau d'irrigation.	231
Figure 9.6 : Mode de gestion des travaux d'entretien du réseau d'irrigation.	231
Figure 9.7 : La durée du tour d'eau.	232
Figure 9.8 : Suffisance de la part des eaux.	232
Figure 9.9 : Besoins en tours d'eau pour les cultures en saison sèche selon les enquêtés.	233
Figure 9.10 : Classification par ordre d'importance des cultures pratiquées dans le Haut Sebou.	234
Figure 9.11 : Conflits et confrontations entre les usagers autour de l'eau.	235
Figure 9.12 : Dates de creusement des puits.	237
Figure 9.13 : Nombre de puits chez les agriculteurs.	237
Figure 9.14 : Carte illustrant la profondeur de quelques ouvrages dans la plaine du Gigou.	238
Figure 9.15 : Date d'approfondissement des ouvrages après le premier creusement.	238
Figure 9.16 : Les causes d'approfondissement du puits.	239
Figure 9.17 : Nombre de mètres approfondis après le premier creusement.	239
Figure 9.18 : Coût d'investissement pour le creusement.	240

Figure 9.19 : Les contraintes empêchant le creusement ou l'utilisation des eaux des puits.....	240
Figure 9.20 : Domaines d'usages des eaux souterraines dans le Haut Sebou.....	240
Figure 9.21 : La superficie irriguée par les eaux des puits	241
Figure 9.22. Les types des cultures irriguées par les eaux des puits	241
Figure 9.23 : Fréquence d'utilisation des eaux des puits dans le Haut Sebou	242
Figure 9.24 : Nombre des heures de pompage	242
Figure 9.25 : Les mois où les agriculteurs utilisent beaucoup les eaux des puits	243
Figure 9.26 : Carte de la piézométrie (mai 2012)	244
Figure 9.27 : Profondeur des puits et hauteur d'eau relevée en mai, 2012.....	245
Figure 9.28 : Remplacement des cultures consommatrices d'eau par des cultures moins consommatrices en eau.....	247
Figure 9.29 : Les agriculteurs bénéficiant des subventions étatiques pour la création de nouvelles plantations.....	247
Figure 9.30 : Part de la technique de goutte à goutte.....	248
Figure 9.31 : Part des agriculteurs qui prévoient la mise en place de la technique de goutte à goutte.....	248
Figure 9.32 : Les principales contraintes de l'utilisation de la goutte à goutte comme technique d'irrigation	249

Chapitre 10

Figure 10.1 : Composants d'un modèle d'après (Singh, 1995)	
Figure 10.2 : Etapes de la construction d'un modèle hydrologique.....	258
Figure 10.3 : Modèle par rapport au système naturel: Entrées, sorties, et les erreurs.. ..	259
Figure 10.4 : Architecture du modèle d'OrchHy2 (Gille, 2003)	261
Figure 10.5 : Algorithme du bilan hydrique	262
Figure 10.6 : Architecture du modèle GR2M.....	264

Chapitre 11

Figure 11.1 : Hydrogramme observé et simulé à la station d'Azzaba	268
Figure 11.2 : Hydrogramme observé et simulé à la station de Dar El Hamra.....	269
Figure 11.3 : Régression linéaire entre les débits observés et simulés aux stations d'Azzaba et de Dar El Hamra.....	269
Figure 11.4 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station d'Azzaba	271

Figure 11.5 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station de Dar El Hamra.....	271
Figure 11.6 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station de Pont de Mdez	271
Figure 11.7 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station d'El Mers.....	272
Figure 11.8 : Bilan hydrologique sur les bassins du Haut Sebou	273
 Chapitre 11	
Tableau 11.1 : Valeurs du coefficient de vidange mensuel de nappe en pourcent	267
Tableau 11.2 : Principaux paramètres de calages et résultats du bilan hydrologique aux stations....	272

TABLE DES PHOTOS

Chapitre 6

Photo 6.1 : Assèchement complet de l'oued Guigou a cause les prélèvements (point de mesure G11, juillet 2011	170
Photo 6.2: Confluence de l'oued Guigou avec source d'Aberchane	170
Photo 6.3 : Cascade Immouzar Marmoucha	171
Photo 6.4 : Confluence de l'Oued Guigou-Mdez avec Ain Sebou, où il prend le nom de l'oued Sebou	173

Chapitre 7

Photo 7.1 : Cèdre dégradé à Tighboula (Bouleman).....	199
Photo 7.2 : Les steppes d'alfa dans la plaine de Serghina	199
Photo 7.3 : Chênaie peu dense à Maâsser.....	199
Photo 7.4 : Cèdre dégradé à Aguelmam Sidi Ali	199
Photo 7.5 : Thua claire au bassin de Mdez	200
Photo 7.6 : Mattoral	200

Chapitre 8

Photo 8.1 : Seguia édifiée dans les années 50s par la population locale	211
Photo 8.2 : Endiguement de l'Oued et prise d'eau par canaux traditionnels et par motopompages	219

Chapitre 9

Photo 9.1 : Seguia en terre	229
Photo 9.2 : Seguia en béton.....	229
Photo 9.3 : Seguia en béton et en terre	229
Photo 9.4 : L'irrigation gravitaire.....	229
Photo 9.5: Le curage de la Séguia après le passage d'une crue	231
Photo 9.6 : Illustration d'une mesure manuelle du niveau de la nappe.	243

TABLE DES PLANCHES PHOTOS

Chapitre 2

Planche photos 2.1 : Exemple de diversité lithologique.....	61
Planche Photos 2.2 : Diversité de la relation entre le cours d'eau et la structure morfo-structurale	65

Chapitre 4

Planche photos 4.1 : Stations hydrométriques.....	108
---	-----

Chapitre 6

Planche photos 6.1 : Le jaugeage avec la perche Pirée et point par point.....	164
Planche photos 6.2 : Exemple du point de jaugeage au seuil : G21d2 et Srh1	164
Planche photos 6.3 : Exemple des mesures effectuées durant les campagnes de jaugeage dans la zone d'étude (Juin 2010, Mai 2011, Juillet 2011 et Septembre 2011).....	165

Chapitre 7

Planche photos 7.1 : Forêt dense de chêne dans le bassin de Taffert dans le Moyen-Atlas plissé	199
Planche photos 7.2 : Parcours/pâturages dans la cuvette de Serghina et la région de Timahdite.....	200
Planche photos 7.1 : Barrage Sehb El Merga.....	210
Planche photos 7.2: Equipements hydrauliques abandonnées	211
Planche photos 7.3 : Les deux premiers barrages en amont de l'oued Guigou : Barrage Moymouss (à gauche) et barrage Igiw (à droite)	219

Chapitre 9

Planche photos 9.1 : Exemple de seguias équipées de vannes dans la plaine de Guigou	230
Planche photos 9.2 : L'oignon et la pomme de terre dans la plaine de Guigou.....	235
Planche photos 9.3 : Exemple de motopompes utilisé de le Haut Sebou	242
Planche photos 9.4 : La plantation de nouvelles cultures soutenues dans le cadre de PMA	247
Planche photos 9. 5 : L'irrigation par la technique d'aspersion	248
Planche photos 9.6 : Equipements de la technique de la goutte à goutte à Guigou	248

TABLE DES ANNEXES

Annexe 2.1 : Formules	299
Annexe 3.1 : Chronogramme des stations pluviométriques utilisées	300
Annexe 3.2 : Chronogramme de précipitations journalières utilisées	301
Annexe 3.3 : Chroniques des données de pluie et de débit journalier suivant les quatre stations	301
Annexe 3.4 : Matrice des corrélations entre les stations pluviométriques (coefficients de détermination R^2).....	302
Annexe 3.5 : Climagramme illustrant les gradients bioclimatiques dominant dans la zone d'étude à partir de quatre stations couvrant l'amont le médian et l'aval du bassin versant.....	303
Annexe 3.6 : Précipitations annuelles moyennes à la station d'Aguelmam Sidi Ali et d'Aïtkhabach..	304
Annexe 3.7 : Ajustement statistique des pluies annuelles à la station de Boulmane	305
Annexe 3.8 : Organigramme montrant la logique qui sous-tend l'algorithme de calcul de l'évapotranspiration "MODIS" (Qiaozhen M ; et al, 2007)	307
Annexe 3.9 : Spatialisation des pluies.....	308
Annexe 3.10 : Spatialisation interannuelle des températures	319
Annexe 3.11 : Gradient thermique	320
Annexe 3.12 : Relation ETP/altitude.....	320
Annexe 3.13: Spatialisation interannuelle d'ETP.....	320
Annexe 3.14: Spatialisation mensuel d'ETP.....	321
Annexe 4.1 : Débits moyens annuels et module	324
Annexe 4. 2 : Variabilité des débits du Haut Sebou 1984-1985/2009-2010	325
Annexe 4.3: Ajustement des modules	326
Annexe 5.1: Ajustement des débits de crues	327
Annexe 5.2 : Caractéristiques de l'écoulement pour les épisodes de crue aux stations	328
Annexe 5.3: Illustration de l'extraction des QMNA exemple ; Azzaba : 1993,1994 et 1995.....	330
Annexe 5. 4 : CUSUM des QMNA de Haut Sebou.....	330
Annexe 5.5 : variations des rangs des années des étiages en fonction des différentes variables retenues (Azzaba).	331

Annexe 5.6 : Hydrogramme composé des mois de septembre à la station d’Azzaba et d’El Mers et débit modal selon Fréchet (pour la station d’El Mers les valeurs supérieur à 3 ne sont pas représentées).....	332
Annexe 5.7 : Courbes des logarithmes des débits classés pour les mois des septembres.....	333
Annexe 5.8 : Histogrammes du nombre de phases de tarissement selon le nombre de jours.....	334
Annexe 5.9 : Valeurs du mode Fréchet.....	335
Annexe 5.10 : Courbes par la méthode des pentes.....	336
Annexe 5.11 : Statistiques descriptives des phases de tarissement pour les stations étudiées.....	340
Annexe 5.12 : Variation d’alpha de tarissement	341
Annexe 5.12 : Figure Variation d’alpha de tarissement	341
Annexe 5.13 : Phases de tarissement obtenues à partir d’un ajustement graphique (Vidange « successive » des nappes)	342
Annexe 6.1 : Feuille de jaugeage et feuille de calcul	344
Annexe 6.2 : Rendement hydrologique par bassin unitaire	346
Annexe 9.1 : Questionnaires d’enquête.....	349
Annexe 9.2 : Codage des questionnaires dans SPSS.....	357
Annexe 9.3 : Procédure d’octroi d’autorisation de creusement de puits et réalisation des forages..	358

« ... L'eau et le développement humain durable sont, nous le voyons, indissociables. Sans un approvisionnement adéquat en eau, sans une gestion saine de cette ressource, le développement socio-économique peut-être tout simplement remis en cause et l'on peut affirmer sans risque de se tromper, que le défi de l'eau sera crucial dans les années à venir... »

Extrait de la lettre envoyé par FEU SA MAJESTE LE ROI HASSAN II aux participants au premier colloque international sur l'eau, Marrakech 21 mars 1997.

« ... Le temps est donc venu pour nous de changer radicalement notre perception et notre attitude à l'égard de l'eau, à travers la gestion de la demande de cette ressource et la rationalisation de sa consommation »

« Il nous incombe, parallèlement, d'aller plus loin dans la réalisation d'installations de stockage et d'assurer, dans un souci de solidarité inter-régionale, le transfert des eaux à partir des bassins excédentaires vers les bassins déficitaires ...»

Extraits de l'allocution prononcée par SA MAJESTE LE ROI MOHAMMED VI 9ème session du CSEC, Agadir le 21 juin 2001.

Remerciements

Rien ne vaut une sincère reconnaissance envers toutes les personnes qui nous ont épaulés, chacune à sa façon. C'est pour moi un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui m'ont, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis, par leur soutien et leur collaboration de mener à bien ce travail. Voilà pourquoi, nous profitons de ce moment idéal pour nous adresser tout spécialement à :

Mes directeurs de thèse, Brahim AKDIM, Emmanuel GILLE et Sébastien LEBAUT, pour la qualité de leur encadrement tant sur le plan scientifique qu'humain, leurs encouragements, leur enthousiasme et leur grande disponibilité au cours de ces cinq années.

J'ai été chanceux et heureux d'avoir comme directeurs de thèse des professeurs comme vous. Vos compétences, votre sérieux, votre générosité scientifique, votre gentillesse et vos implications dans ce travail m'ont beaucoup apporté, et je tiens à vous exprimer ma grande reconnaissance.

Merci cher professeur Akdim, qui a mis sa confiance en mes capacités, en acceptant de diriger cette thèse. Et qui a su me motiver tout au long de ces années.

Merci Emmanuel de me faire l'honneur d'accepter la direction de ce travail, et de m'avoir fait profiter de tes connaissances scientifiques. Votre expérience dans le domaine de l'hydrologie et de la modélisation m'a été profitable.

CHOUKRANE Sébastien, d'avoir assuré avec un dynamisme sans faille l'encadrement de cette thèse. Merci de m'avoir apporté une aide précieuse au cours des différentes étapes, par tes conseils, par ton aide et ton savoir-faire sur le terrain et au Labo. Je te remercie encore pour ta totale compréhension des problèmes que j'ai dû affronter tout au long de la réalisation de ce travail. Les sorties de terrain, ainsi que les séjours à Metz demeurent un souvenir inoubliable

Mon travail de thèse s'est déroulé dans le cadre du Projet de collaboration franco-marocaine « volubilis ». Je voudrais donc remercier toutes les personnes qui ont créé ce projet, les professeurs de LAGEA et de LOTERR, merci de m'avoir intégré au projet SIGRES et également pour vos encouragements tout au long de ces cinq ans. Je vous exprime toute ma reconnaissance pour la confiance que vous m'avez accordée au cours de ces années.

Il est également de mon devoir de remercier tous les professeurs du LAGEA. J'insiste à les remercier chacun par son nom : M. Khalid OBDA, M. Ali TAOUS, M. Abdelatif TRIBAK,

M. Youssef BENBRAHIM, M. Abdelghani GARTET, M. Hassan DAIDE, M. Mohamed CHAOUKI, M. Abdelhamid IDRISSE JANATI et Mme Amina ELBOUICHI.

J'adresse mes sincères remerciements aussi à tous les membres de LOTERR pour leur accueil chaleureux et d'avoir mis à ma disposition leurs compétences et connaissances. Je les remercie également pour leurs qualités scientifiques et humaines ainsi que leur modestie. Chokrane Didier Francois, Luc Manceau, et Benoit Losson.

Je tiens aussi à présenter mes remerciements les plus distinguées aux membres de jury :

Mes professeurs *Mohamed LAAOUANE* et *Mhamed AMYAY* ont accepté de juger ce travail dont ils sont les rapporteurs. Je les remercie d'avoir examiné mon manuscrit dans les moindres détails, et de m'avoir fait part de leurs nombreuses remarques et commentaires très pertinents.

Rachida NAFAA, professeur et doyenne de la FLSH d'El Mohemmadia a également accepté de faire partie du jury de cette thèse. Je tiens à lui exprimer toute ma sympathie pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail. Je la remercie vivement d'avoir bien voulu m'honorer de sa présence en tant que présidente du jury.

Alain DEVOS, professeur à l'université de Reims, a accepté d'être rapporteur de ce travail, je le remercie d'avoir examiné mon manuscrit en tant que spécialiste et connaisseur du Haut Sebou.

Je ne peux échapper à diriger mes pensées à mes parents dont l'amour et les prières ont dépassé les frontières pour me réchauffer le cœur et me faire oublier les longues heures de solitude. Merci mes parents, mes frères, mes sœurs.

El ghachi Mohammed mérite également une attention toute particulière, pour sa disponibilité et ses conseils éclairés.

Un immense merci à mon cher collègue Hamid Hnia et mon frère Zohair Qadem pour le soutien sur le terrain, un grand merci aussi à Nejjari Abdelouahab.

A toutes ces personnes, ainsi qu'à tous mes amis (es) et mes camarades, je ne peux les citer tous puisqu'ils sont nombreux je dédie ce modeste travail en témoignage d'amour le plus sincère. Merci Si Mohamed LASRI

QUANTIFICATION, MODELISATION ET GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU DANS LE BASSIN VERSANT DU HAUT SEBOU (MAROC).

Résumé

L'eau constitue un des défis majeurs de notre époque quelque soit le continent, et à l'instar de nombreux pays de la rive sud de la méditerranée, le Maroc est particulièrement affecté par une pénurie d'eau. Il apparaît que pour pallier ce manque d'eau il est fait appel à la grande hydraulique (128 barrages au Maroc) pour alimenter, à partir des régions les plus arrosées, des bassins versants les plus propices ou des régions riches en eau souterraine, les villes principales ou des périmètres agricoles irrigués de grande surface. Néanmoins cette politique de grande hydraulique qui prévaut actuellement se heurte à plusieurs limites (durée limitée des réservoirs, nombres de sites propices, investissements) si bien qu'un des leviers prometteurs reste une gestion efficace des ressources en eau. Cependant, pour bien les gérer il est essentiel de connaître la quantité d'eau disponible dans chaque bassin ainsi que ses différentes utilisations.

Ce travail de thèse est une contribution à la connaissance de la ressource en eau sur un territoire clef. Le Moyen-Atlas, que l'on peut considérer comme le "château d'eau" du Maroc. Une démarche géographique est mise en place, tant au niveau de l'évaluation de la ressource que celle de l'utilisation, sur une des trois grandes unités hydrologiques qui draine le Moyen-Atlas : le bassin versant du Sebou à l'amont de la station hydrométrique d'Azzaba. Organisé en 4 parties ce travail, inscrit dans un cadre de coopération franco-marocain, démontre l'hétérogénéité des processus hydrologiques en relation avec un contexte géographique montagnard complexe. Tant l'analyse des phases hydrologiques que l'apport de la modélisation démontrent une contribution importante des eaux souterraines aux débits des cours d'eau mais également l'importance de sa redistribution à l'intérieur du bassin du Haut Sebou et vers les bassins contigus. D'autre part une enquête auprès des agriculteurs démontre les mutations agricoles en cours dans ce secteur du Moyen-Atlas et met en évidence les changements des modes de prélèvement d'eau dans l'hydrosystème : le système traditionnel de prélèvement au fil de l'eau étant de plus en plus concurrencé par des prélèvements à même la nappe par pompage.

Mots clés : Ressource en eau, Maroc, Haut Sebou, quantification, gestion, SIG, modélisation.

QUANTIFICATION, MODELLING AND MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE WATERSHED OF HIGH SEBOU (MOROCCO).

Abstract

Water is one of the major issues of our time in all continents. Like many countries on the southern shore of the Mediterranean Sea, Morocco is particularly affected by water shortages. It seems that to overcome this lack of water, the country uses large hydro (128 dams in Morocco) to power, from the regions that receive the largest amounts of rain, or regions richest in groundwater, major cities and agricultural areas irrigated large area. However, this large and predominant hydraulic policy faces such several limitations (limited life of reservoirs, number of sites suitable, and investment) that promising levers remain efficient ways of managing water resources. However, to effectively manage this, it is essential to know the amount of water available in each basin and its different uses.

This thesis is a contribution to the knowledge of water resources in a key area. The Middle Atlas can be considered the "water tower" of Morocco. A geographical approach is in place, both in terms of the resource assessment and use of one of three major hydrological units that drains the Middle Atlas: the watershed of the Sebou up stream of the hydrometric station Azzaba. set in 4 parts, this work- being of the Franco-Moroccan academic cooperation- demonstrates the heterogeneity of hydrological processes in relation to a complex mountainous geographical context. Both the analysis of hydrological phases and the contribution of modeling show a significant contribution of groundwater to stream flow, the importance of redistribution within the basin of the Upper Sebu and from adjacent basins. In this regard, research in the form of survey aimed at apopulation farmers shows agricultural changes forming in the Middle Atlas sector, and highlights the changes in water sampling modes in river systems, the traditional sampling system over water being increasingly challenged by levies same groundwater pumping.

Key Words: High Sebou, water resource, quantification, management, GIS modeling.

تكميم، نمذجة وتدبير الموارد المائية بعالية حوض سبو بالأطلس المتوسط (المغرب)

ملخص

تعتبر الموارد المائية من أهم التحديات التي تميز عصرنا هذا في شتى أنحاء العالم. وعلى غرار باقي دول الضفة الجنوبية للحوض المتوسط يعتبر المغرب من بين الدول التي أصبحت تواجه ندرة المياه. هذا الوضع فرض على المغرب منذ وقت مبكر نهج سياسة السدود لتعبئة الموارد المائية لتأمين حاجيات الحواضر والمناطق السقوية الكبرى.

لكن سياسة السدود هذه تعترضها اليوم اكراهات كثيرة أبانت عن محدودية نجاعتها . (اشكالية التوحد، الاستثمارات الضخمة....). ليبقى الحل الوحيد هو التدبير المعقلن و الرشيد لهذه المادة. ولبلوغ هذا الهدف من الضروري أولا معرفة الكميات المتاحة في كل حوض وكذلك طرق استعمالها.

الهدف من هذا البحث هو المساهمة قدر الإمكان في معرفة الموارد المائية بإحدى أهم المناطق الإستراتيجية بالمغرب (الأطلس المتوسط باعتباره خزان المغرب). ولتقييم الموارد المائية و طرق استعمالاتها بحوض عالية سبو تم الاعتماد على مقارنة جغرافية لبلوغ هذا الهدف .

يندرج موضوع البحث هذا في إطار شراكة مغربية فرنسية على مستوى الجامعتين. حيث تمت صياغته في أربعة أبواب مكنت من إبراز عدم تجانس الصيرورات الهيدرولوجية في علاقتها بسياق جغرافي جبلي معقد.

وقد مكن تحليل الفترات الهيدرولوجية والنمذجة من إبراز الدور الهام الذي تلعبه الموارد الجوفية في تغذية المجاري المائية وتوزيعها مجاليا داخل الحوض المائي .

منهجية البحث اعتمادا على الاستقصاء الميداني والاتصال المباشر بالفلاحين ساهمت كذلك في توضيح التحولات الزراعية التي يشهدها المجال.

كما مكن البحث الميداني أيضا من تشخيص التحولات على مستوى إستغلال الموارد المائية بالطرق التقليدية وكذلك الحديثة منها التي تعتمد تقنية ضخ الموارد الجوفية.

كلمات مفاتيح: عالية سبو، موارد مائية، تكميم، تدبير، نظم المعلومات الجغرافية، نمذجة.

Introduction générale

Aujourd'hui, la pénurie en eau douce est visible dans de nombreuses régions de la planète (Haudret, 2008) et la conjugaison de facteurs anthropiques et environnementaux conduira à une intensification et à une extension géographique remarquable de ce phénomène dans un futur proche. Le bassin Méditerranéen, région pauvre en eau, connaît déjà une surexploitation de cette ressource qui le classe parmi les zones les plus affectées par un risque de pénurie (Margat, 2008). Ce phénomène touche plus particulièrement les pays du Sud qui ne sont dotés que de 13% du volume total des ressources méditerranéennes en eau estimés à un milliard de mètres cubes par an, mais dont la moitié seulement est exploitable, ajoute l'auteur.

Le Maroc s'inscrit dans ce contexte où l'eau est placée sous le signe de la rareté. Qui plus est la rareté est exacerbée par l'irrégularité. En effet, le pays reste dans la majeure partie de son territoire soumis à un climat essentiellement semi-aride à aride, principalement influencé par une irrégularité annuelle et une variabilité inter-annuelle très marquées des précipitations et une hétérogénéité de leur distribution ce qui limite de fait la ressource en eau. A cet égard le pays a connu plusieurs sécheresses dont une dizaine a concerné sa majeure partie. D'après le ministre délégué chargé de l'eau au Maroc, les épisodes les plus remarquables des années 1944-1945, 1980-1985, 1991-1995 et 1998-2002 ont intéressé la majeure partie du territoire national pendant une durée pouvant atteindre cinq années successives, constituant ainsi les sécheresses les plus sévères et les plus longues jamais observées depuis que des observations météorologiques et hydrologiques sont effectuées. De plus, les sécheresses répétées de ces dernières décennies, les prévisions des modèles climatiques indiquant un réchauffement planétaire affectant plus spécifiquement la Méditerranée du sud et de l'est (Boulet, 2010), laissent penser que le déficit pluviométrique est une donnée structurelle du Maroc.

L'économie marocaine va pâtir de cette situation dans la mesure où elle est étroitement dépendante de l'abondance des précipitations comme le souligne la forte dépendance entre le PIB et le PIB Agricole. Alors, le déficit que constitue l'irrégularité spatiotemporelle de la pluviométrie et des ressources en eau impose la nécessité de la gestion de la ressource à partir de la construction de grands barrages réservoirs pour stocker les apports des années humides au profit de leur utilisation en années sèches. Elle impose également, lorsque cela est possible, la réalisation de transferts d'eau des régions favorisées vers les régions

déficitaires en eau dans le but de favoriser un développement économique et social équilibré sur l'ensemble du territoire du pays d'une part, et de renforcer l'approche de solidarité entre les régions d'autre part. En effet, les politiques et les actions effectuées par l'état dans ce cadre montre combien la gestion de l'eau est au cœur de nombreux enjeux, touchant au quotidien à l'histoire des hommes. Néanmoins la réalisation de ces projets de grandes hydrauliques n'est qu'un des leviers pour lutter contre la pénurie d'eau. Il ne doit pas occulter un autre levier, tout aussi crucial, celui d'une meilleure gestion de la ressource. Mais une gestion adéquat nécessite une connaissance approfondie d'une part de la ressource, tant temporellement que spatialement mais également des usages qui son faits. Dans cette optique, ce présent travail de recherche veut contribuer à la connaissance de la ressource en eau dans une région déterminante pour le Maroc à cet égard : le Moyen-Atlas, considéré comme le "château d'eau" du Maroc. Cet apport se fait dans le cadre d'une unité spatiale hydrologique, celle du bassin versant du Haut Sebou à la station d'Azzaba.

Ce mémoire est organisé en quatre parties. La première partie, "problématique et contexte physique de l'étude", revient dans un premier chapitre sur la problématique et les objectifs de l'étude et présente la démarche adoptée. Le deuxième chapitre expose le contexte physiographique du bassin versant et les paramètres clés qui en définissent les potentialités en eau et les conditions de l'écoulement. Le troisième chapitre porte sur les grandes tendances hydro-climatiques et met en évidence les variations spatio-temporelles de celles-ci. La seconde partie est dédiée à l'hydrologie analytique. Après avoir présenté les données hydrologiques disponibles, le deuxième chapitre rend compte de l'organisation fine des écoulements en régime stabilisé non directement influencé par les précipitations. Le troisième chapitre s'intéresse aux phases hydrologiques, crue, étiage et tarissement. La troisième partie traduit la dimension humaine dans notre approche. Le premier chapitre expose le cadre socio-économique et l'occupation du sol de la zone d'étude. Dans un deuxième chapitre nous présentons une synthèse de l'irrigation au Maroc et dans le Moyen Atlas ainsi que son importance dans l'agriculture marocaine. Le dernier chapitre s'attache à l'analyse des résultats d'une enquête sur les prélèvements et l'utilisation de l'eau pour l'irrigation que nous avons réalisée ; Elle permet de poser entre autres un diagnostic précis sur les mutations en cours. Enfin la quatrième partie constitue en quelque sorte le bilan de notre étude sous la forme de modélisations des composantes du cycle hydrologique dans le bassin. Le premier chapitre en présente un cadre théorique alors que le deuxième est consacré à la mise en œuvre et à la discussion des résultats.

Partie I

*Problématique, approche
et contexte de l'étude*

Introduction de la première partie

Cette première partie fixe le cadre de notre étude. Après avoir rappelé sa problématique nous en exposons le cadre scientifique, contexte et démarche, et le cadre géographique, caractéristiques physiques et climatiques du bassin.

Ces travaux s'étant déroulés dans le cadre d'une collaboration bilatérale initiée il y a vingt ans, il nous a paru important de faire le point sur ce contexte particulier. De la même façon, le Moyen Atlas ayant fait l'objet de nombreux travaux nous avons souhaité faire état des références bibliographiques majeures en préalable à l'exposé de la démarche.

Dans un deuxième temps le cadre général du bassin versant du Haut Sebou aborde les caractéristiques physiques du milieu et identifie les composantes majeures maîtrisant le fonctionnement hydrologique et la circulation de l'eau.

Pour finir, le dernier chapitre s'intéresse au contexte climatique et aux grandes tendances dans les séries temporelles pluviométriques. Nous mettons également en évidence les hétérogénéités spatiales des variables climatiques au sein du domaine d'étude et en proposons des spatialisations dans le but de quantifier les apports au "système hydrologique".

**** Chapitre 1 : problématique, objectifs, méthode et approche**

Sommaire

Introduction

I-Cadre de la thèse

II- Etat de l'art

III- Problématique de l'étude

IV- Objectifs, méthode et approche

1-Les objectifs de cette étude

2-Méthodes et approches

V- La collecte de l'information existante : bibliographie, données

VI- La production de données : mesures hydrométriques et enquête

VII- Organisation et traitements des données

VIII- Modélisation et bilans

Conclusion

Introduction du chapitre 1

Le présent chapitre a pour objectif de rappeler le cadre de l'étude et de jeter un bref éclairage sur les travaux qu'a connus l'aire d'étude dans le domaine de l'hydrologie ou des sciences connexes. Par ailleurs, ce chapitre est également consacré à la présentation de la problématique étudiée et de la méthodologie adoptée pour réaliser le travail.

I- Cadre de la thèse

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé dans le cadre d'un Partenariat Hubert Curien (PHC) « Volubilis », programme de coopération scientifique bilatéral franco-marocain. Dans ce cadre, le projet intitulé SIGRES "Système d'Informations pour la Gestion des Ressources en Eau de Surface" a été porté par une équipe du LAGEA de l'université Sidi Mohamed Ben Abdelah de Fès et le laboratoire LOTERR de l'université de Lorraine (2010-2013).

SIGRES vise à mettre en place un système d'informations géographiques pour évaluer et gérer les ressources en eau de surface dans le bassin versant du Sebou en amont de Fès. Cette région de moyenne montagne est soumise à un important exode rural. Le maintien de cette population dépend de l'activité agricole elle-même soumise aux disponibilités en eau. Les mutations en cours vis-à-vis des usages de l'eau se manifestent dans l'intensification des cultures et l'élargissement des surfaces agricoles

SIGRES doit aboutir à une densification des informations relatives à la connaissance de la ressource en eau comme les précipitations, les écoulements moyens et de basses eaux (situation la plus déterminante pour les usages agricoles) par exemple.

Ce projet de recherche fait suite à un premier projet de collaboration sur le Haut Sebou, également dans le cadre d'un PHC Volubilis. Achevé en 1998 il a porté pour une grande part sur l'organisation des débits de basses eaux et la cartographie des rendements dans des situations hydrologiques stabilisées. A la suite, Devos dans le cadre d'une bourse d'excellence de l'Aupelf-Uref et Nejari ont poursuivi et affiné le travail sur l'organisation spatiale des écoulements et des prélèvements. Les résultats ont été communiqués dans un rapport (Devos, 1998) et dans la thèse de Nejari soutenue en 2002. Obda (2004) a utilisé la même méthodologie pour étudier l'organisation spatiale des débits du Nekkour et dans sa thèse de doctorat d'état a comparé le fonctionnement hydrologique du bassin du Haut Sebou

avec celui-ci. Comme nous venons de le voir notre travail s'inscrit à la suite de travaux déjà très denses sur le bassin du Haut Sebou. Néanmoins il apporte de nouveaux résultats, renforce et affine ce qui avait déjà été démontré. A cela plusieurs causes. La première tient au parti pris de poursuivre nos investigations au seuil d'où les auteurs précédemment cités les avaient laissées ; Par exemple du point de vue hydrologique nous avons mené un travail minutieux sur les phases de crue et de tarissement. Du point de vue des usages les enquêtes nous ont amenés au cœur de l'exploitation alors que les auteurs n'avaient jusqu'ici travaillé qu'au niveau de la seguia. La deuxième cause tient aux progrès réalisés dans le domaine de la télédétection. En effet depuis la fin des années 1990 de nouveaux capteurs embarqués dans des satellites enregistrent à haute résolution temporelle les changements d'état de l'atmosphère et du sol ce qui permet le calcul de variables comme l'ETP ou l'ETR, par exemple, à une échelle kilométrique. Bien que ces données d'un nouveau type soient encore entachées d'une grande incertitude elles constituent néanmoins un point d'appui à la réflexion sur les transferts d'eau entre bassins par exemple. Enfin, la troisième cause tient à l'aspect aléatoire du climat ; En effet, le début du projet s'est inscrit dans un contexte climatique d'excédent pluvial à l'opposé de la profonde sécheresse qui a marqué les années 1990, durant laquelle l'oued Sebou s'était asséché pendant plusieurs mois à la station d'Azzaba (en 1995). Les années 2008 à 2010 sont de loin les plus pluvieuses des 50 dernières années si bien que nous avons reproduit le protocole de mesure de débits en régime stabilisé sur les mêmes points qu'il y a 15 ans. La comparaison de ces campagnes de mesures de contextes climatiques contrastés permet d'affiner les caractéristiques des aquifères.

II- Etat de l'art

Compte tenu de sa position stratégique au cœur du Maroc et des richesses qu'il possède, le Moyen-Atlas a fait l'objet de l'attention d'auteurs et de chercheurs dans de nombreux domaines. Plus particulièrement ces dernières années cet espace géographique, dont le Bassin du Haut Sebou occupe une place importante, compte tenu des mutations spatiales en cours a fait l'objet d'études de la part de nombreux chercheurs. En préalable à l'exposé de la problématique et des objectifs de notre travail nous présentons les résultats de l'inventaire bibliographique afin de faire un point sur les travaux réalisés antérieurement sur le Moyen Atlas comme unité géographique et contexte régional du bassin du Haut Sebou. Le résultat de cette recherche a permis de regrouper ces travaux dans 4 volets principaux : géologie, hydrologie, Forêt et végétation, et occupation du sol et activité humaine.

- Les études consacrées à la géologie : la diversité géologique caractérisant le domaine d'étude a attiré l'attention de nombreux spécialistes depuis le début du 20^{ème} siècle. Les principaux auteurs sont Terminer (1936), Colo (1961), Ben Tayeb & Leclerc (1977), Charrière (1990), Sabaoui (1987 et 1998), Martin (1981), Fedan (1978, 1984, 1987) et Nicod (1997). L'ensemble de ces travaux de recherches ont permis de mettre en place une base de données assez fournie sur le contexte géologique de la région.
- Les études consacrées à l'hydrologie : le Moyen Atlas est le "château d'eau" du Maroc. Les 4 fleuves importants Oum-er-Rbiâa, Sebou, Beht et Moulouya y prennent leur source. Le bassin du Haut Sebou est une partie essentielle de ce "château d'eau" puisqu'il représente 10% de la ressource en eau du Maroc et a donc suscité un intérêt permanent des scientifiques et des chercheurs à propos de la quantification de la ressource en eau, de la spatialisation et de la variabilité des écoulements superficiels et souterrains ainsi que des activités humaines liées à cet "or bleu". On dénombre à titre d'exemples les travaux d'El Khalki (1990, 1991, 2000), Devos (1998), Benjelloul (1999), Benaabidat (2000), Nejari (2002), Obda (2004) Bekkari (2009). Ces travaux ont traité différentes thématiques, entre autres la sécheresse, les indigences extrêmes, les systèmes d'irrigation communautaire. Par ailleurs la grande variabilité spatiale des conditions climatiques et géologiques du Moyen Atlas est favorable à la diversité des écosystèmes aquatiques ; Il s'agit des sources de montagnes, des étangs et des lacs (Ifrah, Ifer, Aoua, Sidi Ali, Afnourir.....). Ces derniers ont fait l'objet de nombreux travaux de recherches dans la mesure où ils représentent des zones importantes pour la conservation d'une biodiversité particulière aussi bien végétale qu'animale. Parmi ces nombreux travaux, on peut citer ceux de Chillasse (2000, 2004) et de Daki (2003, 2004). Ces lacs présentent également des valeurs écologiques, paysagères, socio-économiques et culturelles de grand intérêt d'où le classement de quelques sites dans la liste RAMSAR des zones humides importantes au niveau international depuis 1980. Pour cet exemple on peut citer les travaux de Seghair (2009) sur l'Aguelmam Afnourir. En outre, plusieurs travaux ont été menés sur l'Aguelmam Sidi Ali, situé à l'amont du Haut Sebou, notamment par Gille et al., (2000) et Sayad et al., (2011).

- Le rôle de la végétation sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants n'est plus à démontrer. A cet égard le Moyen Atlas est un milieu bien boisé qui contient la plus grande surface forestière du Maroc. Les résultats de nombreux travaux consacrés à la forêt et à la végétation nous ont servi dans ce travail. Nous pouvons citer ceux de Baudy (1950), Pujos (1963), Mouna (1982), Belghazi (1983), Ezzahiri (1989), Badidi (1995), Labhar (1993, 1998), Benabid (2000), Rhoujjati (2007). Badidi a rédigé une thèse de doctorat sur la révolution des vergers de rosacées dans le Moyen Atlas dont on s'est plus particulièrement servi dans notre étude sur les mutations agricoles qu'a connu le Haut Sebou.
- Enfin, pour ce qui concerne l'occupation humaine nous pouvons faire référence aux travaux très fouillés de Jennan (1986, 2004) sur la géographie humaine dans le Moyen Atlas, et notamment son doctorat d'état intitulé : "le Moyen Atlas central et ses bordures, mutations récentes et dynamiques rurales".

III- Problématique de l'étude

L'économie marocaine est étroitement dépendante de l'abondance des précipitations comme le souligne la forte dépendance entre le PIB et le PIB Agricole. Or le Maroc se caractérise par un climat semi-aride marqué par une grande irrégularité annuelle et inter-annuelle ainsi que par une grande variabilité spatiale des précipitations. Cette irrégularité constitue donc un facteur limitant du développement socio-économique d'autant plus que le Maroc a connu une période sèche de quasiment trois décennies.

De plus le taux de ressource en eau par habitant, qui exprime la richesse ou la rareté relative de l'eau d'un pays, avoisine au Maroc le seuil de 1000 m³/an/habitant (Rapport sur le développement dans le monde, 2010), communément admis comme seuil critique indiquant l'apparition de pénuries. En raison d'une utilisation et d'une gestion peu rationnelle du potentiel hydrique ces ressources connaissent une raréfaction de plus en plus accrue si bien qu'elles se situeraient autour de 720 m³/an/habitant vers 2020. A cette date 35% de la population totale du pays, disposerait de 500 m³/an. Ces indicateurs montrent que la pénurie chronique d'eau est une donnée structurelle dont il faut tenir compte dans les politiques et les stratégies de gestion des ressources en eau. En conséquence, la croissance de l'offre, qui a constitué la réponse traditionnelle à la demande jusqu'à présent a trouvé ses limites et se heurte à des obstacles économiques, sociaux et écologiques croissants. Un des leviers

possible pour assurer la pérennité de la ressource en eau est d'assurer une gestion plus efficiente de l'eau. A cette égard un des objectifs majeurs énoncé par le Plan Bleu (améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau pour faire face aux pénuries d'eau en méditerranée, Plan Bleu, Sophia-Antipolis, 2007) est de « promouvoir la gestion intégrée des bassins versants incluant les eaux de surface et souterraines... ».

Nos travaux de thèse s'inscrivent tout à fait dans cette problématique d'autant plus qu'ils s'appliquent au bassin du Sebou (40 000 km²) qui abrite 22.7% de la population marocaine et dispose de 29,4% de la ressource en eau renouvelable du Maroc. Plus particulièrement pour le Maroc central, l'oued Sebou est une artère hydrologique vitale pour le développement régional et l'économie du pays. Ses affluents alimentent en eau potable d'importantes agglomérations (Fès, Meknès, Kénitra, Khemisset, etc.), d'importants périmètres agricoles irrigués (le Saïs et la plaine du Gharb) et est équipé d'importants barrages (volume de stockage total de 5872 Mm³). Son bassin versant supérieur, considéré à la station d'Azzaba, en constitue la principale source de production de cette eau : ce bassin est notre objet d'étude.

Il s'agit d'un bassin à forte pression anthropique, dont les processus hydrologiques souterrains et de surface sont soumis à des variations spatio-temporelles qui dépendent des entrées météorologiques et des caractéristiques physiographiques des terrains. La spatialisation des phénomènes à l'échelle des sous bassins versants des ressources en eau et leur cartographie générale reste à effectuer. En effet le réseau hydrométrique existant (5 stations pour 4677 km²) ne permet pas de connaître avec suffisamment de précision la répartition des eaux de surface. L'expérience du terrain et la bibliographie ont montré son importante disparité liée à la répartition des pluies, à la nature géologique du bassin extrêmement variée (causses karstifiés, marnes, coulées basaltiques...) et à une organisation complexe et parfois ancienne des prélèvements dans le réseau hydrographique et dans les dayats.

La question de l'influence de la pression anthropique sur les ressources en eau dans un bassin où les activités agricoles ne cessent d'augmenter se pose. Ainsi sur la manière pertinente d'évaluer la ressource en eau pour une gestion durable de celle-ci dans l'optique d'intégrer toutes les variables naturelles de l'hydrosystème régionale ainsi que les interactions anthropiques en vue d'établir un système de maîtrise et de gestion des ressources

en eau pour affronter les défis et besoins prospectifs du développement socio-économique de la zone.

IV- Objectifs, méthode et approche

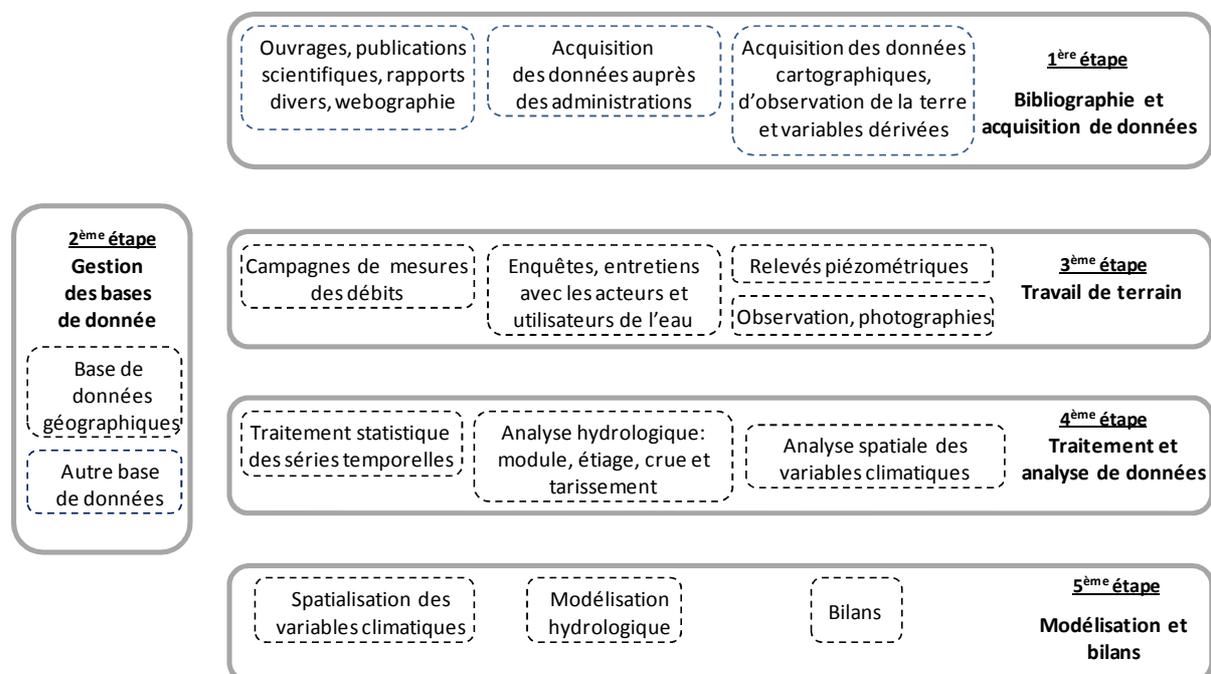
1- Les objectifs de cette étude

L'objectif de notre travail est de collecter les connaissances existantes sur l'hydrosystème, d'en produire de nouvelles lorsqu'elles manquent, de les organiser dans un système à références spatiales (SIRS) dans le but d'une estimation spatialisée quantifiée d'une part des ressources en eau et d'autre part des usages faits de celles-ci, le but étant de fournir un référentiel sur lequel reposer une réflexion sur la gestion intégrée du bassin du Haut Sebou.

2- Méthodes et approches

La méthode adoptée s'articule sur la valorisation de données multi-sources. Elle s'appuie d'un côté sur une approche de l'hydrologie classique et modélisatrice qui consiste en une étude analytique dont les résultats seront utiliser pour la calibration et la validation d'une modélisation hydrologique. D'un autre côté elle mobilise les techniques d'enquêtes pour estimation des usages de la ressource, ses modes et sa dynamique de prélèvement. La démarche peut être décomposée en 5 étapes (fig.1.1).

Figure 1.1 : Démarche de thèse



V- La collecte de l'information existante : bibliographie, données

Cette première étape, mais qui en réalité s'est poursuivie tout au long de la thèse, a consisté en la collection de deux types d'information. Le premier concerne classiquement la consultation de travaux universitaires (thèses, mémoires et articles scientifiques) et des rapports administratifs des acteurs de la gestion de la ressource en eau tels que l'Agence Hydraulique du Bassin de Sebou (ABHS), le Haut Commissariat des Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification, Direction Provincial d'Agriculture (DPA) de Boulemane, Ifrane et Sefrou... On peut aussi y mettre les informations déjà organisées sous forme cartographique, telle la topographie, la géologie et la géomorphologie.

Le deuxième a trait à la **donnée**, c'est-à-dire aux variables mesurées qu'elles soient hydrologiques, météorologiques, hydrogéologiques... ou d'ordre humaine, celles des recensements de population par exemple. Signalons ici que l'accès à la **donnée** a pu s'apparenter à une véritable quête tant celle-ci "a du mal à sortir des administrations". Mais finalement à force de persévérances, en usant de chemins détournés parfois, nous sommes parvenus à réunir des chroniques de données le plus souvent complètes et cohérentes dans l'ensemble. Un autre type de données caractérisant notre zone d'étude a été utilisée, celles dérivées des mesures faites à partir des satellites de télédétection. Téléchargées à partir de serveur "ftp" elles concernent surtout les valeurs d'évapotranspiration potentielle et réelle ainsi que le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Pour terminer des données exogènes à notre territoire, le plus souvent spatialement ou temporellement ponctuelles, ont également été utilisées pour augmenter l'échantillon de mesures dans la validation de certains calculs.

VI- La production de données : mesures hydrométriques et enquête

Il est indéniable que l'originalité d'un travail géographique est inspirée de l'originalité des données de terrain et des résultats que l'on peut en tirer. A cet égard nos mesures sur le terrain ont visé à nourrir notre analyse sur les deux volets, ressources et usages/utilisation, à la base d'une réflexion sur la gestion de l'eau.

Le premier volet est constitué de mesures ponctuelles de débits en régime non directement influencé par les précipitations. De telles données, déjà obtenues au milieu des années 1990 (cf. supra), permettent une déglobalisation de l'information hydrologique généralement

intégrée dans les relevés aux stations, et donc d'avoir une "cartographie" plus fine de la ressource. Des inventaires de forages et de puits ont également été faits ainsi que des mesures piézométriques quand cela était possible.

Pour le deuxième volet nous avons également réuni une information originale sur la base d'enquêtes et d'entretiens avec les utilisateurs et les acteurs de l'eau ; Ceci afin de mettre en évidence la pression sur la ressource en eau ainsi que les mutations en cours sur les modes de prélèvement.

VII- Organisation et traitements des données

Ce travail repose sur un grand nombre de données de divers formats : cartes papiers, séries temporelles de données pour une quarantaine de postes météorologiques et 5 stations hydrométriques, MNT, images satellites brutes, variables dérivées des mesures satellitaires, données sur des dizaines de forages, résultats de centaines d'enquêtes, une cinquantaine de points de mesures des débits, données exogènes etc.... Pour en faire des analyses poussées et mettre en place un référentiel cartographique, la cohérence spatiale de ces données multi-sources s'est faite dans un système d'information à référence spatiale (SIRS) et plus particulièrement dans un Système d'Information Géographique (SIG).

Le terme SIG s'utilise pour évoquer les outils logiciels (systèmes informatiques) mis en œuvre dans les organisations et susceptibles d'assurer les quatre grandes fonctions informatiques (saisie et acquisition, gestion et stockage, analyse et enfin affichage/édition/présentation sur des données géographiques (Poron, 2011). Dans notre démarche le SIG s'entend davantage du point de vue fonctionnaliste comme Huxhold et al (1995, in Roche, 2000) le définissent : « un ensemble de technologie informationnelles, de données et procédures pour la collecte, le stockage, la manipulation, l'analyse et la présentation de cartes et l'information descriptive sur les objets qui peuvent être représentés sur une carte ». Tous les traitements de données impliquant l'analyse spatiale des facteurs et variables intervenant dans la dynamique des écoulements de surfaces et souterrains et par conséquent dans celle de la ressource s'est fait dans le logiciel ArcGis™. Les cartes présentées dans le présent document sont produites à partir de ce logiciel.

Le traitement statistique des données hydro-climatiques s'est appuyé sur des logiciels généralistes comme "Excel" ou "Tanagra" par exemple ou alors sur des outils plus spécifiques tels Hydracces, Khronostat, River Analysis package, PCRaster... pour l'analyse

des séries temporelles par exemple ou SPSS pour le dépouillement et l'analyse des résultats de l'enquête auprès des acteurs de l'eau.

VIII- Modélisation et bilans

Devant la pression croissante sur les ressources en eau, la préoccupation principale réside dans la planification efficace pour garantir la gestion durable de la ressource. Mais la réalisation de cet objectif se heurte à une difficulté majeure liée aux lacunes importantes existantes sur les connaissances de base des ressources en eau. Afin de combler ces lacunes, les modèles hydrologiques sont parmi les outils disponibles permettant d'acquérir une compréhension adéquate des caractéristiques du bassin versant (Tessema, 2011).

Une partie de ce travail aura comme objet une modélisation de la relation pluie/débit à l'échelle mensuelle dans le but d'inscrire toutes nos observations dans une représentation cohérente du fonctionnement hydrologique des bassins versants du Haut Sebou aux stations hydrométriques. Cette modélisation va permettre de représenter la réalité complexe du fonctionnement des bassins. Par ailleurs, les modèles retenus permettront de simuler l'évolution conjointe des termes du bilan de l'eau dans chaque compartiment du cycle de l'eau (ETR, la réserve dans le sol et le sous-sol, et le débit des cours d'eau...).

Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre a replacé le travail dans son contexte scientifique et collaboratif. Il a par ailleurs permis de jeter un bref éclairage sur les principaux travaux réalisés antérieurement sur le domaine d'étude.

L'exposé sur les SIG (Systèmes d'information géographique) dans ce chapitre est justifié par l'importance qu'il occupe actuellement dans la géographie comme outil informatisé dédié à la gestion de l'information pour le suivi et la gestion de nombreux phénomènes telle que la ressource en eau.

****Chapitre 2 : Contexte physiographique du bassin versant**

Sommaire

Introduction

I- Situation géographique et contexte du bassin versant du Haut Sebou à l'échelle du Maroc

II- Le bassin versant

1- Les caractères morphométriques

1-1- Forme et surface

1-2- Hypsométrie et système de pente du bassin versant du Haut Sebou

1-3- Les pentes du bassin

III- Contexte géologique et perméabilité des formations

1- Le contexte général

2- Litho-stratigraphie et perméabilité des formations géologiques

VI- Le réseau hydrographique

1- Le cours principal

2- La densité de drainage

3- Les profils en long

Conclusion

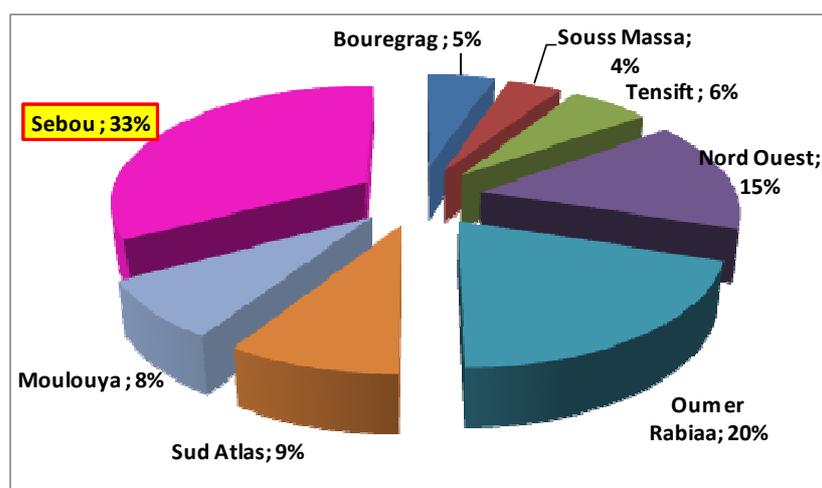
Introduction du chapitre 2

Il est indéniable que l'espace physique constitue l'élément déterminant sans lequel aucune étude hydrologique n'est véritablement possible. Ce chapitre est consacré à l'exposé des aspects physiques du bassin versant du Haut Sebou. Il traitera plus particulièrement des paramètres morphométriques du bassin versant, et le contexte morpho structural. Il s'agit des composants clés qui définissent les potentialités en eau et les conditions d'écoulement du bassin étudié.

I- Situation géographique et contexte du bassin versant du Haut Sebou à l'échelle du Maroc

Le bassin versant du Sebou (fig.2.2) d'une superficie de 40000 km² draine environ 1/3 des écoulements superficiels du Maroc (fig.2.1). Ce bassin est attribué au Moyen-Atlas, souvent qualifié de « château d'eau » du Maroc du fait de ses précipitations importantes et de son nombre important de sources. En outre, le bassin versant du Sebou, peuplé par 5.9 millions d'habitants est l'un des plus riches en eau et constitue l'une des régions les mieux loties en terres irriguées et en industries. Le potentiel de terres cultivées s'élève à 1.750.000 ha. Les superficies irrigables sont estimées à 375.000 ha, dont 269.600 sont actuellement irriguées.

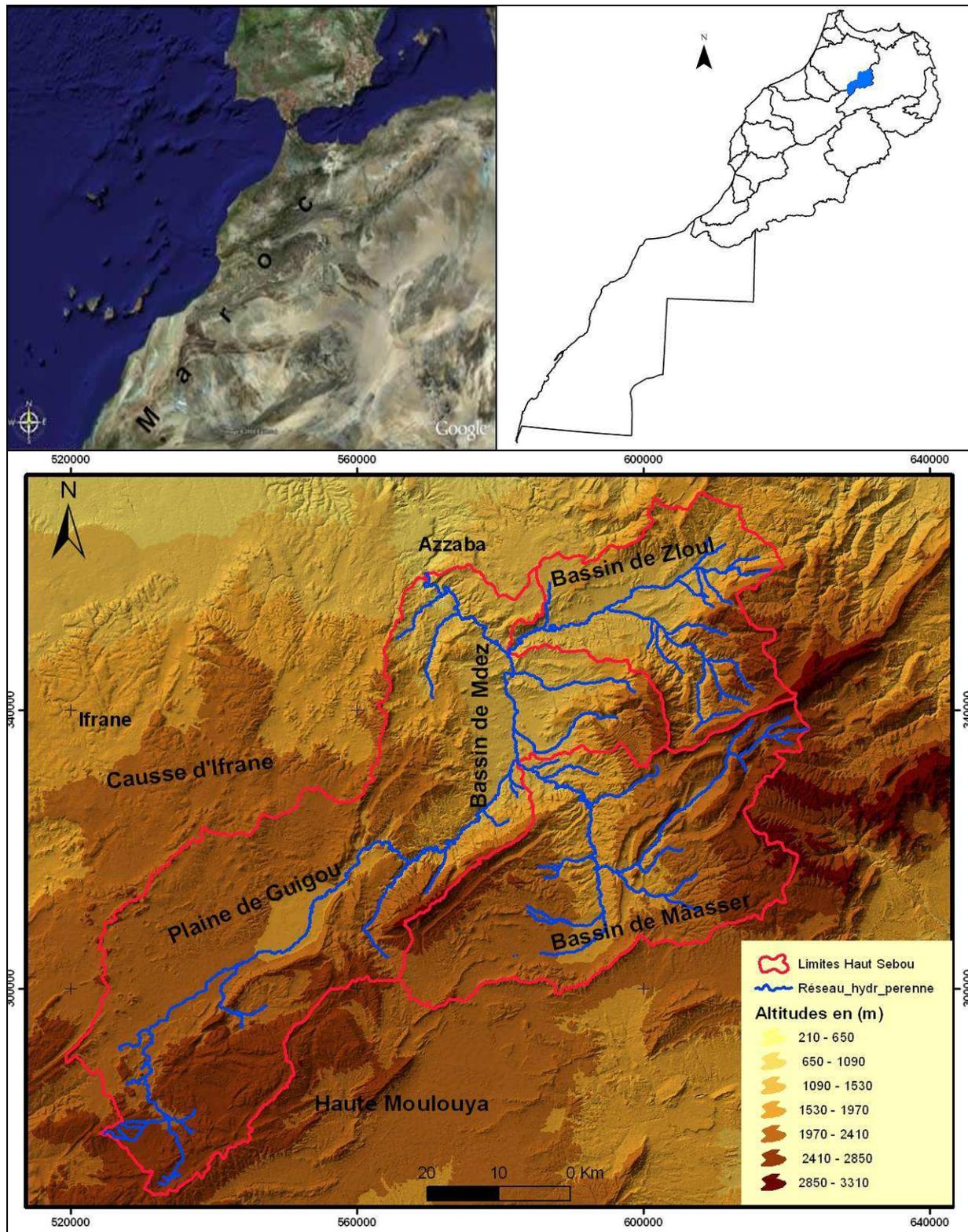
Figure 2.1 : Apport des eaux superficielles par bassin versant au Maroc (source, Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement- Département de l'Eau).



Le bassin amont, dont il est question dans ce travail, draine environ 10% des écoulements du Maroc en année moyenne sur une superficie de 4677 km² à la station d'Azzaba (fig.2.2). Il se situe dans le Moyen Atlas septentrional entre 33° et 34° de longitude ouest, au contact du

Moyen Atlas tabulaire et du Moyen Atlas plissé. Sa position exposée au flux humide d'ouest dominant en fait donc un "château d'eau" à l'échelle du nord de l'Afrique. Il revêt donc un intérêt tout particulier pour le Maroc.

Figure 2.2 : Localisation Sebou/haut Sebou



Rappelons que ce domaine - Moyen Atlas - a attiré l'attention de nombreux chercheurs dans de diverses spécialités (géologie, géomorphologie, hydrologie, histoire....), grâce à la diversité paysagères et les richesses en ressources naturelles qui le caractérise.

II- Le bassin versant

Le bassin versant est considéré comme l'unité de base dans l'étude du milieu naturel. Il s'agit de l'unité de gestion du territoire pertinent d'un point de vue hydrologique, écologique et géomorphologique (Chorley, 1969). C'est une unité complexe dont plusieurs paramètres et composantes naturelles et anthropiques régissent le cycle hydrologique. Loup (1974) décrit le bassin versant de la manière suivante : « La surface réceptrice des eaux qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe est le bassin versant. On le définit par sa morphométrie, ses caractères climatiques, sa géologie, sa végétation, ses sols. » L'auteur intègre dans sa définition les eaux souterraines.

Notre recherche sur le bassin versant du haut Sebou s'appuie sur les données hydrométriques à la station d'Azzaba ; Elle contrôle un bassin de 4677 km² au sein duquel les principaux affluents, le Guigou, le Mâassèr et le Zloul sont également équipés de stations hydrométriques. Au total l'étude des modalités de fonctionnement du bassin versant du Haut Sebou s'appuie sur 4 sous bassins.

1- Les caractères morphométriques

1-1-Forme et surface

Une première caractérisation des bassins versants peut se faire à partir de leurs indices morphométriques. Les surfaces de bassin, les longueurs de drain ainsi que les indices de compacité de Gravelius et du rectangle équivalent (formules en annexe 2.1) sont en relation avec le comportement hydrologique du bassin versant. Le fleuve amont du Sebou d'une longueur de 174 km à Azzaba draine un bassin versant relativement étiré (tab.2.1) ralentissant la réponse hydrologique. Par contre ses 2 drains affluents d'une longueur de 36 et 52 km sont plus compacts témoignant d'une avec concentration assez élevée des écoulements et une évacuation rapide de ceux-ci.

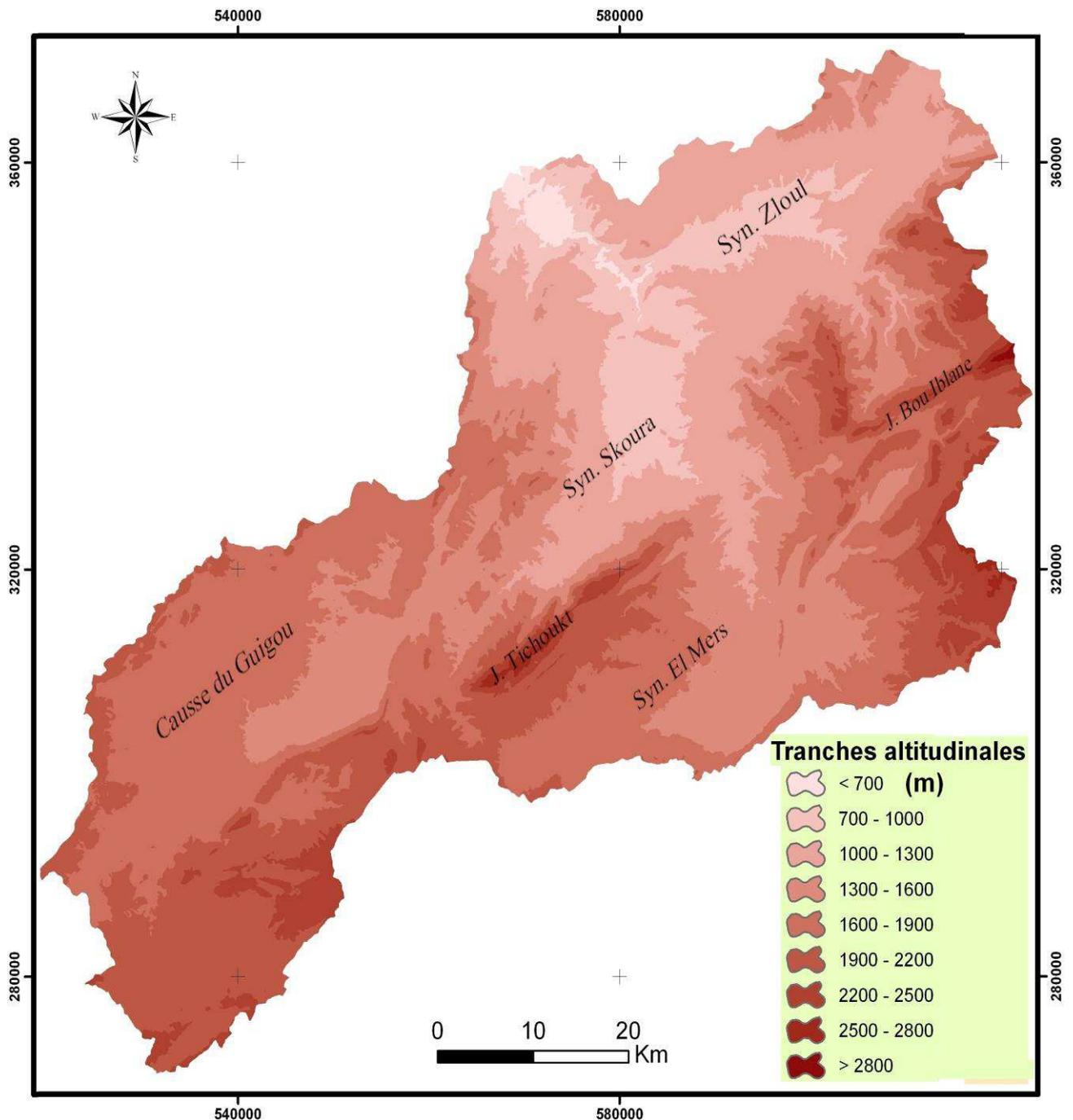
Tableau 2.1: Caractéristiques morphométriques du bassin versant du Haut Sebou

Bassin versant	Superficie (km ²)	Périmètre (km)	Longueur de l'Oued (km)	Indice de compacité	Longueur du rectangle équivalent	Largeur du rectangle équivalent
Guigou à Aït Khabach	1275	181	76	1,42	65,10	19,59
D'Aït Khabach au Pont Md'ez (Avec Maaser)	2198	257	62	1,53	96,70	22,73
MÂASSÈR	1320	209	36	1,61	80,94	16,31
Zloul	760	156	52	1,58	59,89	12,69
Haut Sebou	4677	434	174	1,78	174,99	26,73

1-2-Hypsométrie et système de pente du bassin versant du Haut Sebou

Les altitudes du relief sont des facteurs climatiques. Ils déterminent les ascendances des masses d'air ou les positions d'abris aux flux dominants. En conséquence sur un territoire donné il contrôle les gradients thermique et pluviométrique. Pour cela l'étude de l'hypsométrie est un préalable nécessaire à l'étude d'un bassin versant.

Les altitudes du Haut Sebou sont comprises entre 472 m à Azzaba à 3081 m à jbel Bou Iblane pour une altitude médiane de 1430 m. Globalement, les altitudes décroissent du sud vers le nord, mais celles des sous bassins décroissent vers les centres des dépressions (fig 2.3). On peut par ailleurs distinguer des nuances marquées et une hétérogénéité entre les sous bassins versants. En amont du Haut Sebou, le sous bassin de Guigou est le plus élevé avec une altitude moyenne de 1950 m. D'après le classement de l'ORSTOM, c'est un relief élevé et favorable aux précipitations neigeuses (Obda, 2004).

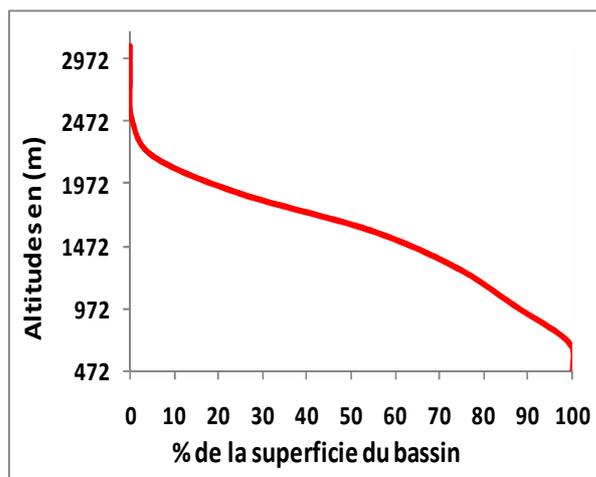
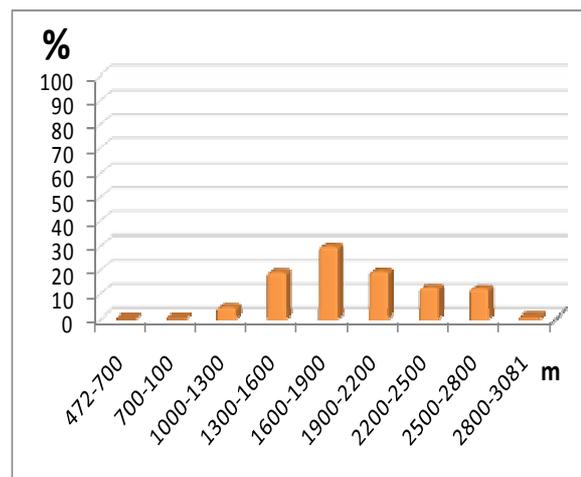
Figure 2.3 : Hypsométrie dans le bassin du Haut Sebou

Le bassin du Zloul, présente les altitudes les moins élevées bien qu'il recèle le massif de Bou Iblane dont le sommet est le plus élevé du bassin du haut Sebou (3081 m) ; C'est donc un bassin très accidenté avec la présence d'une large dépression.

Tableau 2.2: Répartition des altitudes dans le bassin versant du Haut Sebou

Tranches des altitudes en (m)	surface (km ²)	Pourcentage %	Pourcentage cumulé %
<700	42,09	0,89	100,00
700-1000	587,49	12,40	99,11
1000-1300	608,92	12,85	86,71
1300-1600	921,91	19,46	73,85
1600-1900	1423,00	30,04	54,39
1900-2200	910,22	19,22	24,35
2200-2500	222,09	4,69	5,14
2500-2800	19,35	0,41	0,45
>2800	1,83	0,04	0,04

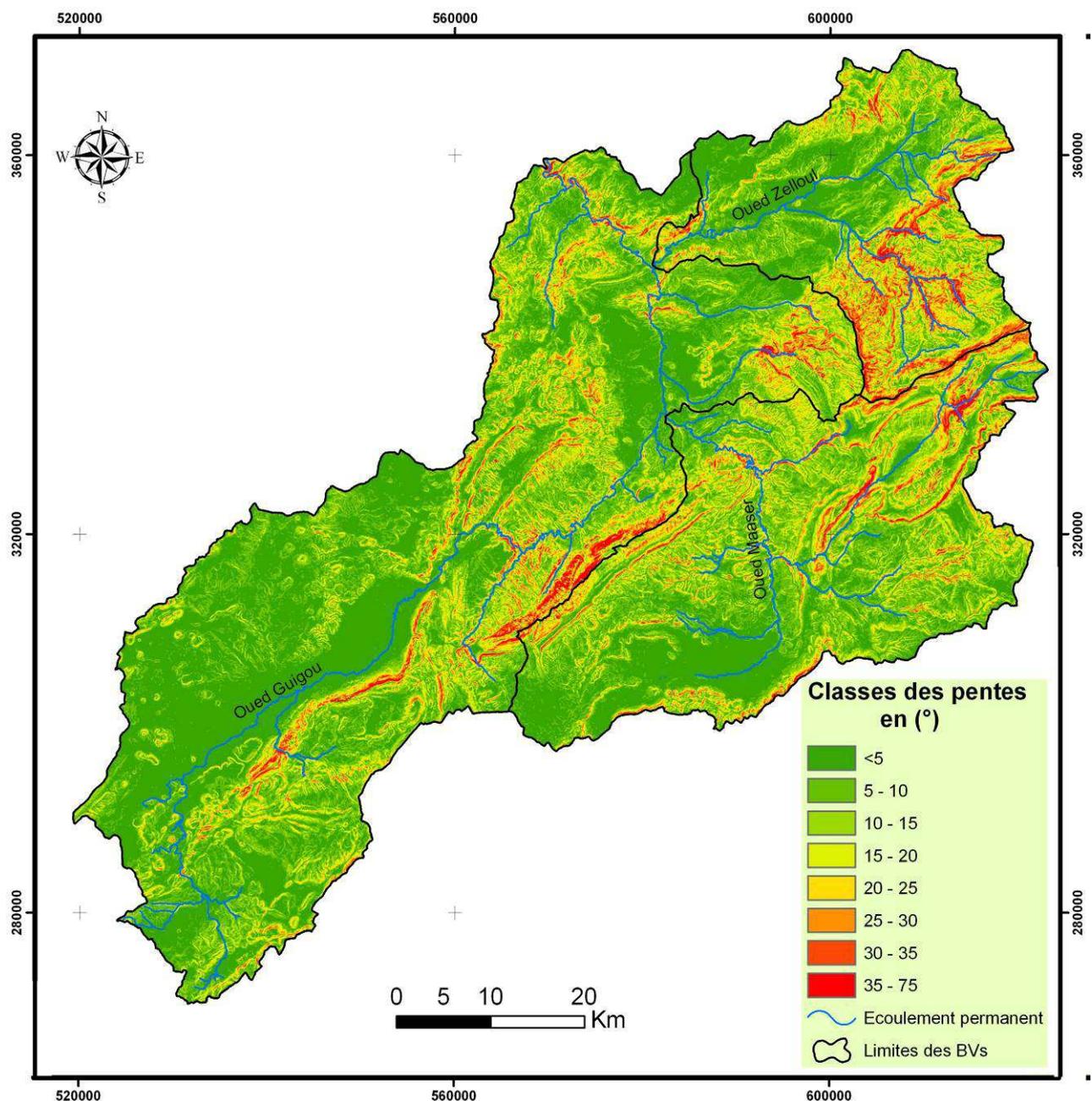
Les altitudes dominantes du bassin sont comprises entre 1300 et 2200 m. Représentant 69% de la superficie totale du bassin versant, elles caractérisent les hauts plateaux, les causses et les piedmonts. Les altitudes les plus basses, inférieures à 1000 m, représentent 13% et correspondent essentiellement à la vallée de Mdez Sebou, tandis que les lignes de crêtes des montagnes (Jbel Bou Iblan entre le bassin de Mâassèr et Zloul et Jbel Tichoukt entre Guigou et Mdez), supérieures à 2500 m, ne concernent qu'une petite superficie soit 1% de la superficie totale du bassin versant (tab.2.2, fig.2.4 et 2.5).

Figure 2.4 : Courbe hypsométrique du bassin du Haut Sebou**Figure 2.5 : Répartition hypsométrique du bassin du Haut Sebou**

1-3- Les pentes du bassin

Les pentes sont des facteurs qui conditionnent la configuration des filets d'eau, des lignes d'écoulement et de ruissellement formées par la pluie. Les pentes des bassins versants sont un critère important car elles déterminent la vitesse d'écoulement et donc l'érosion. Dans le Haut Sebou, les pentes s'accroissent avec le volume et l'altitude de la montagne. En revanche, les larges cuvettes et dépressions constituent des espaces de pentes faibles. La figure (2.6) montre que la moitié de la surface du bassin est dominée par des pentes inférieures à 15°.

Figure 2.6 : Carte de pente du bassin versant



Les variations de l'indice de formes et de l'hypsométrie entre les sous bassins du Haut Sebou, sont parmi les autres facteurs qui influencent le comportement hydrologique (réponse hydrologique, ressuyage....) dans le dit bassin.

III- Contexte géologique et perméabilité des formations

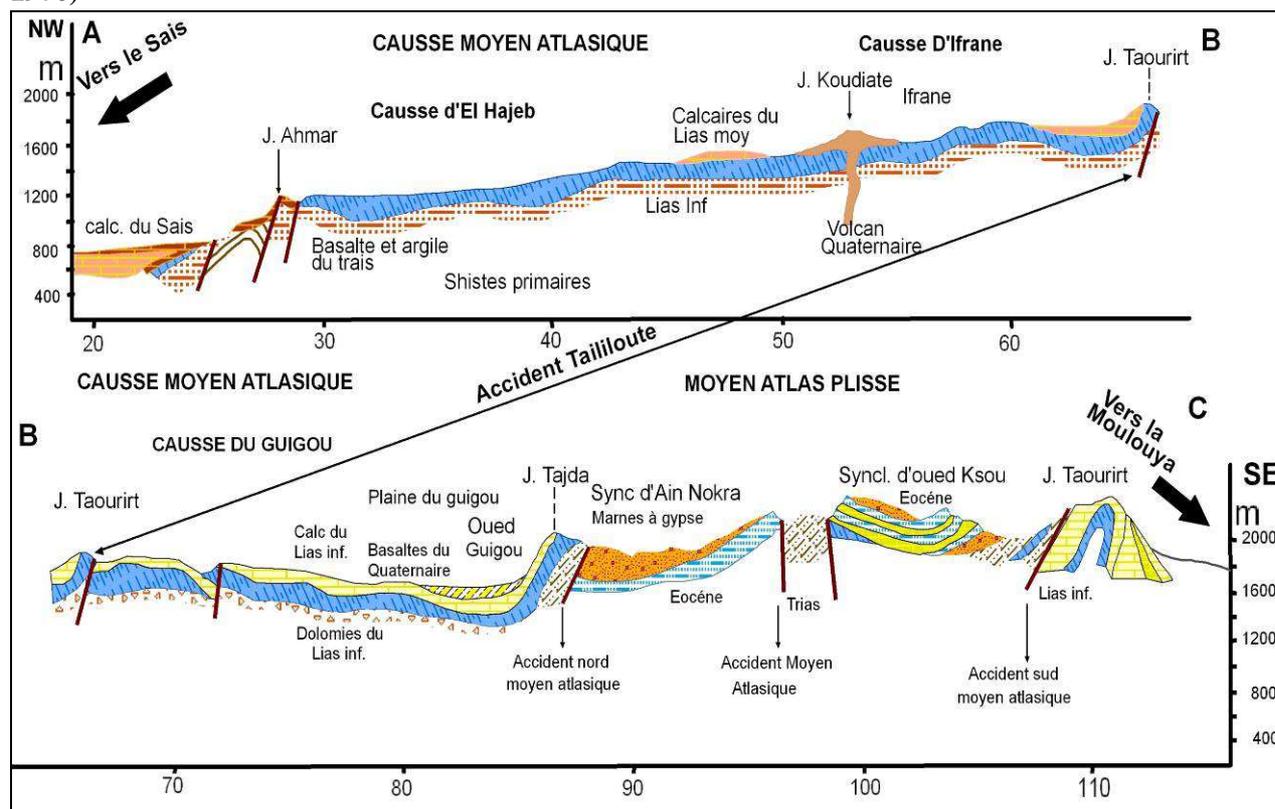
Le contexte géologique est un paramètre considéré comme fixe dans l'approche développée dans ce travail. Il contrôle en partie l'action d'autres paramètres tels que l'organisation du réseau hydrographique, la nature des sols, la géomorphologie, la végétation, etc.

Dans ce chapitre, nous rappelons le contexte géologique du bassin du Haut Sebou sur la base des nombreux travaux et notamment ceux de Terminer (1937), Colo (1961), Charrière (1990), Sabaoui (1978 et 1998), Martin (1981), Fedan (1978), El Khalki (1990), les données de l'atlas du bassin du Sebou (1970), Devos (1998), Nejjari (2002) et Obda (2004). L'ensemble de ces travaux de recherches ont permis de mettre en place une base de données fournie sur le contexte géologique de la région.

1- Le contexte général

La plupart des chercheurs ayant travaillé sur le Moyen Atlas proposent un découpage qui respecte tout d'abord les grands ensembles : le Causse moyen atlasique ou Moyen Atlas tabulaire et le Moyen Atlas plissé. Ensuite, chacun de ces ensembles est découpé en "unités géographiques" (Colo, 1961) ou en "panneaux" (Charrière, 1990), liés à un étagement en blocs, pour le Moyen atlas tabulaire (cause d'Ifrane, d'Azrou, du Guigou...) et à une succession de larges bassins subsidents à géométrie synclinale (synclinaux d'Ain Nokra, du Guigou, du Mdez ...) qui s'intercalent entre d'étroits anticlinaux (Tichoukt, Bou Iblane ...) pour le Moyen Atlas plissé (Nejjari, 2002). L'ensemble forme trois grands compartiments morphostructuraux, septentrional, médian, et méridional, allongés selon une direction sud-ouest/nord-est ; Ils sont séparés par des accidents tectoniques majeurs : l'accident nord moyen atlasique, moyen atlasique, et sud moyen atlasique (fig.2.7).

Figure 2.7 : Coupe géologique du Moyen Atlas septentrional (Source : Atlas du bassin du Sebou, 1970)



Le Causse ou le Moyen Atlas tabulaire :

Situé en rive gauche de l'oued Guigou-Sebou, il est constitué de couches calcaires et dolomitiques liasiques qui s'inclinent vers l'est. Ce domaine a connu un processus de karstification marqué dont témoigne d'une série de poljés (dayat). Le contact entre Causse et Moyen Atlas plissé n'est pas partout très net. Il est très spectaculaire dans la partie centrale de la chaîne (région de Timahdite) où le Causse est dominé par un alignement de plis, tandis qu'au nord et au sud les contrastes s'estompent très rapidement (Lepoutre et al., 1966).

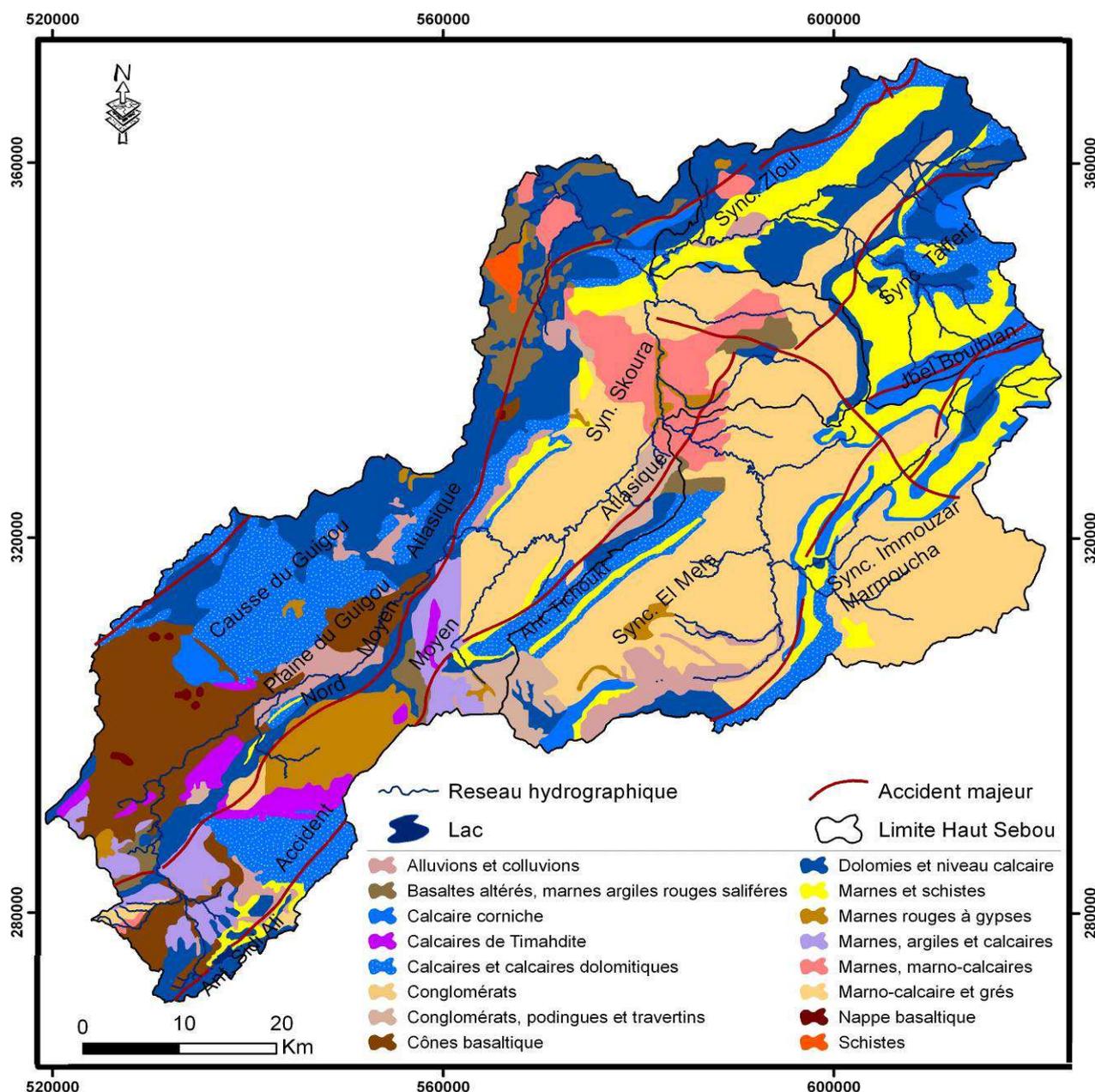
Le Moyen Atlas plissé :

Situé en rive droite de l'oued il est constitué d'une série de plis orientés sud-ouest/nord-est. Les anticlinaux sont étroits et encadrent de larges dépressions synclinales (plaine de Guigou, Skoura, Serghina et Zloul). Ceux du Tichoukt, du Bou Iblane, et du jbel Hayane sont traversées par des accidents majeurs.

2- Litho-stratigraphie et perméabilité des formations géologiques

Du point de vue lithologique les formations carbonatées (dolomies et calcaires) du Jurassique caractérisent le causse en rive gauche du bassin. En rive droite dans le Moyen Atlas plissé, la succession d'étroites rides anticlinales montagneuses séparées par de hautes vallées au fond de synclinaux détermine une plus grande diversité des affleurements (Nejjari, 2002). L'analyse qui suit s'appuie sur la carte lithologique (fig.2.8), le log litho-stratigraphique (fig.2.9) et la synthèse sur les perméabilités des formations géologiques (tab 2.3).

Figure 2.8 : Carte structurale du bassin versant du Haut Sebou. Source (Nejjari, 2002) d'après Terminer & Duber, 1933 ; Dresch et al., 1952 ; Colo, 1961 ; Martin, 1981 ; Mouhdi, 1952.

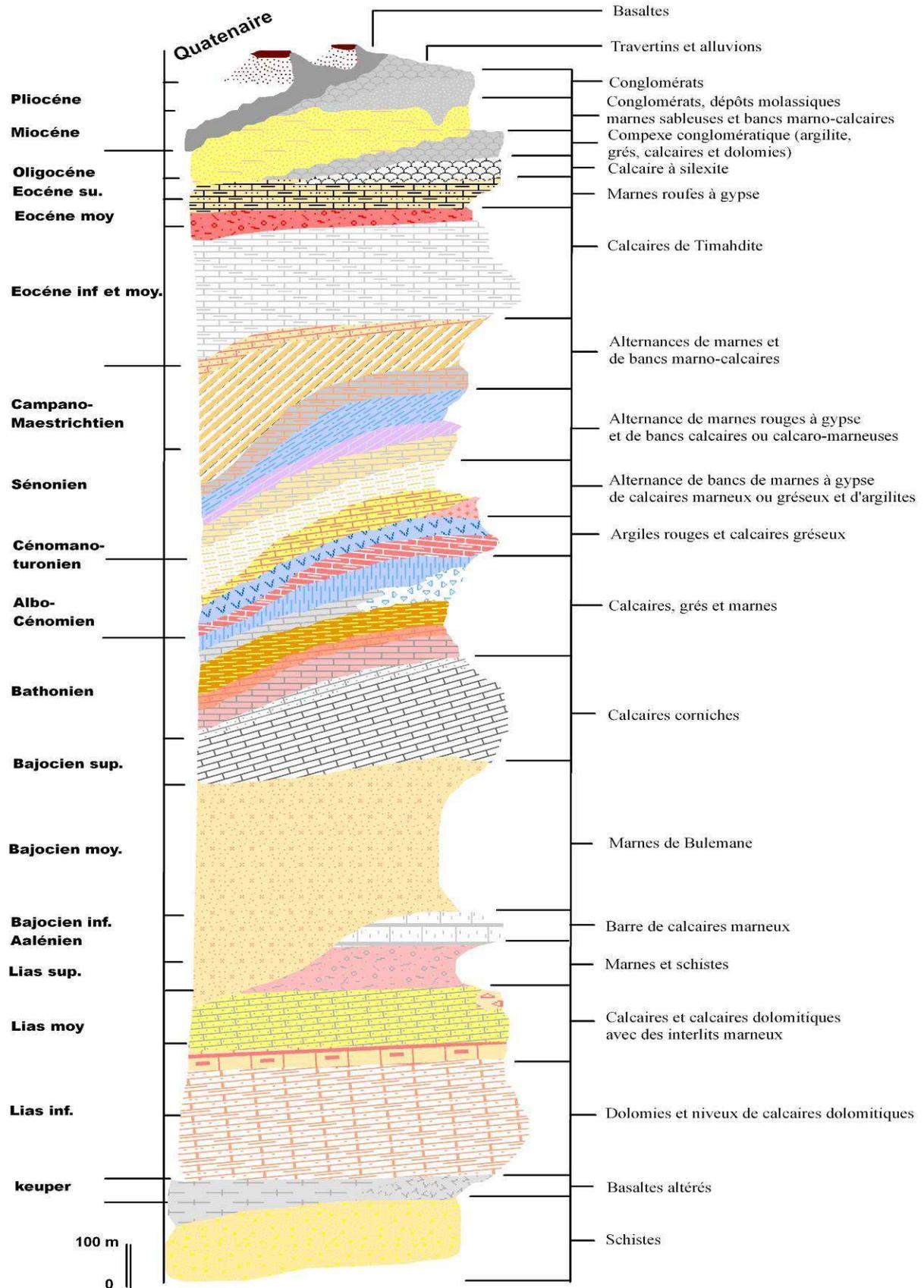


Dans ce travail d'hydrologie, la croissance de la perméabilité des terrains, caractéristique physique qui représente la facilité du transfert de fluide au travers d'un réseau connecté, est essentiel. Définie comme étant l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de potentiel (Castany, 1977), elle est difficilement quantifiable in situ. La méthodologie de l'atlas de perméabilité proposé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (AERM, 1989) propose néanmoins une classification de la perméabilité des terrains à partir d'une classification synthétique et simplifiée des roches, en terrains perméables de fissures ou de porosités, semi perméables, imperméables et en formations superficielles. Nejjari (2002) a appliqué cette méthode sur le Haut Sebou. Nous reprenons ici ses conclusions.

Classiquement les formations sont classées des plus anciennes au plus récentes.

Les schistes paléozoïques, imperméables, affleurent à la faveur d'un bombement anticlinal orienté nord-sud faisant apparaître le socle dans les boutonnières du Bsabis en aval du bassin, notamment dans la vallée de l'oued Boufoul. Ces affleurements couvrent moins de 2% de la superficie totale.

Figure 2.9 : Log stratigraphique du bassin versant du Haut Sebou (source : Nejari, 2002)



Les formations triasiques représentées par des argiles et les basaltes et dont la puissance moyenne est de 200 mètres, affleurent essentiellement sur les bordures du substratum paléozoïque, le long des failles et dans le fond des canyons. Les premières séries reposent en discordance majeure sur les terrains paléozoïques et sont facilement repérables par la couleur rouge des argilites et celles brunâtres des basaltes doléritiques très altérés (Martin, 1981).

Au niveau hydrogéologique, les formations triasiques, imperméables, jouent un rôle très important car elles constituent le mur de nappes phréatiques, lorsqu'elles sont surmontées de formations réservoirs, telles celles du Lias fissuré et karstifié (Obda, 2004). Des sources artésiennes très importantes sont issues des nappes grâce à l'existence de ces barrières qui font remonter les eaux à la surface, c'est le cas par exemple du complexe karstique d'Ain Sebou ; Il s'agit d'une source vaclusienne (Nicod, 1993). Les pertes et résurgences des terrains perméables fissurés du Lias se combinent avec une multitude de sources pour donner aux principaux oueds un régime moins agressif que celui des oueds rifains et hauts atlasiques (Martin, 1981).

Les formations liasiques carbonatées (calcaires et dolomies) représentent la majeure partie des affleurements de rive gauche de l'oued Guigou. Elles couvrent la majeure partie de la rive gauche du bassin de l'oued Guigou (le causse du Guigou), avec l'existence des épanchements basaltiques du Quaternaire. On y trouve les calcaires de Timahdite et les calcaires corniches qui couvrent la marne de Boulemane. Ces dernières n'occupent qu'une petite superficie dans le bassin du Sebou. D'ailleurs, les calcaires et dolomies liasiques profitent d'ondulations anticlinales ou de failles pour affleurer le long des charnières dans le Moyen Atlas plissé (Jbels Tajda, Habdou, Tichoukt, Serghina, Bou Iblane). Ces ensembles dolomitiques stratifiés s'enrichissent progressivement en lentilles calcaires et passent parfois à des couches calcaires continues (Charrière, 1990). L'épaisseur des affleurements liasiques varie selon les conditions paléogéographiques de la sédimentation liasique, et aussi de la vulnérabilité des terrains à l'érosion. L'épaisseur sous la vallée de Guigou est de l'ordre de 200 à 250 m, tandis que le maximum peut atteindre 600 m dans les profondeurs des synclinales, comme le synclinale de Tatassite. (Martin, 1981). El Khalki (1990) signale que ces formations carbonatées, de perméabilité de fissures et karstifiées, constituent un réservoir hydrogéologique d'ampleur, non seulement dans le Haut Sebou, où elles

alimentent de grosses sources, comme par exemple Ain Sebou, Timedrine... mais également dans tout le Moyen-Atlas.

Tableau 2.3: Répartition des grandes formations lithologiques dans le bassin du Haut Sebou (Nejjari, 2002)

Bassin versant	Unité morphostructurale	Roches dominantes	Surface Km ²	Surface %
Guigou à Ait Khabbache 1200Km ²	Fond de Vallées	Alluvions et colluvions	92	08
	Synclinale de Bakrit-Guigou	Basaltes, conglomérats, calcaires et dolomies	910	76
		Alternances des marnes, calcaires et grés	71	06
		Marnes et argiles rouges	127	10
Guigou d'Ait Khabbache au Pont de Mdez avec Mâassèr 2260 Km ²	Fond de Vallées	Alluvions et colluvions	113	05
	Synclinal de Guigou Mdez	Calcaires et dolomies, conglomérats	582	26
		Marno-calcaires et grés	1323	58
	Bassin Mâassèr	Marnes et argiles rouges	242	11
Guigou au Pont de Mdez à Azzaba avec Zloul 1217 Km ²	Fond de Vallées	Alluvions et colluvions	33	03
	Entrée du causse Bassin de Mâassèr	Dolomies et niveau calcaire	607	50
		Alternance de marnes et des calcaires	197	16
		Marnes, argiles rouges et schistes	380	31
Mâassèr 1310 km ²	Fond de Vallées	Alluvions et colluvions	65	05
	Synclinaux de Skoura,	Conglomérats, calcaires et dolomies	265	20
		El Mers, Immouzer Marmoucha	Alternance des marnes, calc. et grés	784
			Marnes et argiles rouges	196
Zloul 750 Km ²	Fond de vallées	Alluvions et colluvions	16	02
	Synclinal du Zloul et du Taffert	Calcaires et dolomies	404	54
		Alternance de marnes, calcaires et grés	65	09
		Marnes, argile rouges et schistes	265	35
Haut Sebou 4677 km ²	Fond de vallées	Alluvions et colluvions	238	05
	Synclinaux de Bakrit-Guigou, Skoura, El Mers, Immouzer Marmoucha, Zloul-Taffert, Entrée du causse	Basaltes, Poudingues, conglomérats, calcaires et dolomies	2099	45
		Alternance de Marnes, calcaires et grés	1591	34
		Marnes, argiles rouges et Shistes	752	16

Les formations du Bajocien moyen au Bathonien représentées par des marnes et des marnes calcaires, sont peu présentes dans le causse mais représentées plus de 40% du bassin

du Zloul (marnes de Taffert) et plus de 70% du bassin du Mâasser où elles sont présentes notamment au niveau des synclinaux d'El Mers et de Skoura.

En effet, à partir du Bajocien moyen et avec des débordements dans le Bajocien supérieur, se développe une puissante couche marneuse appelée communément "marnes de Boulemane" (Charrière, 1990). Cette formation de 300 m d'épaisseur peut atteindre 600 m dans les charnières. Elles sont couvertes par des faciès calcaires appelées "calcaires corniches".

Les dépôts bathoniens, d'extension limitée dans le Moyen-Atlas, sont cantonnés dans les principales dépressions synclinales d'El Mers, de Skoura et de Marmoucha (Soufiani & Fedan, 2002). Dans le synclinal de Skoura, la succession sédimentaire est relativement similaire à celle d'El Mers, à la seule différence qu'elle se termine par des marnes à gypse (Choubert & Faure-Muret, 1960-62). Cette formation apparaît aussi dans le plateau de Timahdite sous la couverture des nappes basaltiques.

-Les dépôts du Crétacé et du Paléogène témoignent d'une transgression marine dans la région sud-ouest du Moyen Atlas. Dans le Haut Sebou, l'extension du Crétacé est limitée aux aires déprimées du sud-ouest jusqu'au nord de Boulemane avec de multiples variations d'épaisseur et de faciès (Nejjari, 2002). Les dépôts sont constitués soit de calcaires gréseux et de marnes ou de bancs calcaires et de marnes gypseuses dont l'épaisseur varie entre 100 et 150 m (bassins d'Ain Nokra et de Tighboula). Ils représentent des formations semi-perméables d'une puissance de 110 mètres, également présents à l'amont du bassin du Guigou (Bakrit, Bou Anguer, et Timahdite).

-Les dépôts molassiques et conglomératiques du Néogène

Selon Martin (1981), la partie sud-ouest du Moyen-Atlas en général et du Haut Sebou en particulier, est le siège d'activités magmatiques et néotectoniques et elle est aussi considérée comme sismiquement active. Il s'agit d'un volcanisme attribué à l'orogénèse alpine (Beaudet, 1969). Les datations radiométriques effectuées ont donné pour le volcanisme plio-quadernaire des âges compris entre 1,8 et 0,5 Ma, attestant que l'activité magmatique dans ce domaine a duré plus d'un million d'années (Harmand et Cantagrel, 1984, El Azzouzi et al., 2010 ; Ntarmouchant et al., 2012). Donc, ces mouvements tectoniques ont généré des régressions et des transgressions marines dans les dépressions. Le synclinal de Skoura, est

un exemple de ces dépressions, où il y a des dépôts continentaux de conglomérats grossiers qui viennent raviner les versants dudit synclinal. Dans la même localité, d'autres formations affleurent, d'origine mixte (basalte, dolomie, calcaire, marne), elles sont appelées « Poudingues de Skoura » qui sont de 50 à 80 m d'épaisseur. Le vocable de « Poudingues de Skoura » est dû à Terminer (1936) qui définit par là les gros dépôts de conglomérats à ciment marneux et à galets bien roulés mais non calibrés (Terminer, 1981).

Sur le plan hydrologique, ces formations peuvent constituer des réservoirs dont l'importance est plus limitée par rapport aux grands réservoirs karstiques du Haut Sebou. (Obda, 2004).

-Les formations du Quaternaire sont limitées au Guigou (amont du bassin du haut Sebou) et sont constituées par des basaltes, des alluvions et des travertins ou tufs. Au Quaternaire le Moyen-Atlas a connu un volcanisme important dont les édifices couvrent environ 300 km² soit plus de 6% de la superficie du bassin du Guigou; Ils se trouvent notamment à l'amont d'Aït Khabach (Synclinaux de Bou Anguer et de Timahdite). L'épaisseur des coulées basaltiques est variable en fonction de l'éloignement aux cônes volcaniques ; on relève respectivement 150, 30, 15 m à proximité de Jbel Hebri, de Timahdite, de Tit Zill et quelques mètres vers l'aval non loin d'Aït Khabach (Nejjari, 2002).

En plus des édifices volcaniques majeurs, on trouve également des formes mineures comme les trous et les petites dépressions attribuées, selon les cas, à des effondrements de tunnels de lave, le plus souvent à des effondrements crypto-karstiques dans le substratum calcaire (Martin, 1981).

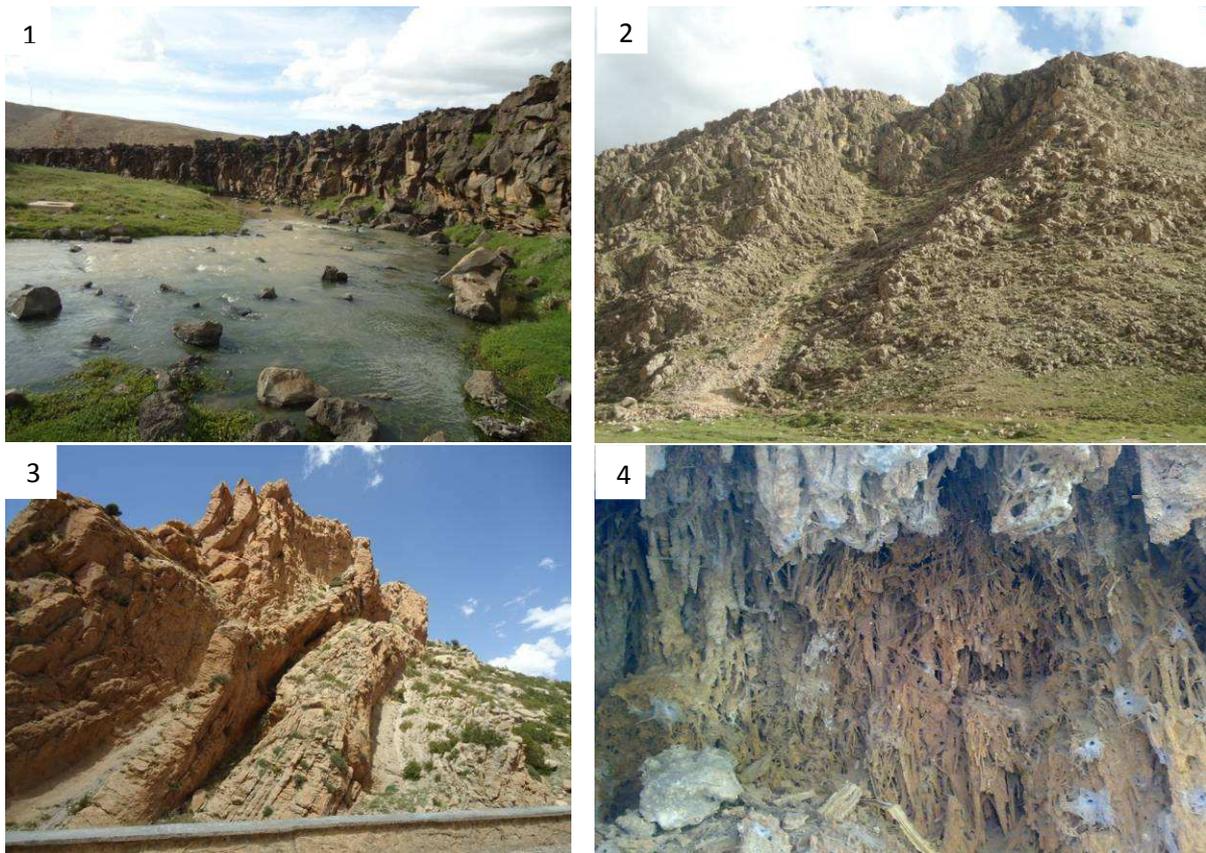
L'importance hydrologique de ces formations basaltiques réside dans leur fracturation. Ils sont donc à classer dans les formations perméables à perméabilité de fractures et constitue de ce fait un aquifère dont la nappe soutient les écoulements via des sources nombreuses et abondantes. Il s'agit notamment des sources appelées Aghbalou Aberchnane drainant la nappe basaltique du synclinal de Bou Anguer, et la source de Tit Zill drainant la nappe basaltique du Causse et de Timahdite. Ipso facto, les formations basaltiques commandent la disponibilité des ressources en eau dans le Haut Sebou.

Les alluvions couvrent une superficie de 238 km² (5 % du bassin), d'après Nejjari, 2002. Elles se trouvent au fond des cuvettes et dans les vallées du Guigou, de la Serghina, du Zloul, du Tazouta notamment.

Ces formations sont perméables et constituent des nappes d'eau souterraine qui participe au soutien des étiages (le cas du Zloul), ou à la diffuence des écoulements (le cas du Mdez). Des phénomènes d'inféro-flux ont été constatés sur le terrain.

Très marginalement des travertins et des tufs sont présents sous forme de dalles perchées et isolées qui coiffent quelques collines ou en multiples accumulations étagées et emboîtées (Nejjari, 2002). Ils sont des indicateurs des phases de karstification active (Vaudour, 1984).

Planche photos 2.1 : Exemple de diversité lithologique



1: Basalte de Bou Anger
Skoura

2 : Calcaire gréseux de Foum El Khneg

3 : Calcaire de Tichoukt

4: Karst de

VI- Le réseau hydrographique

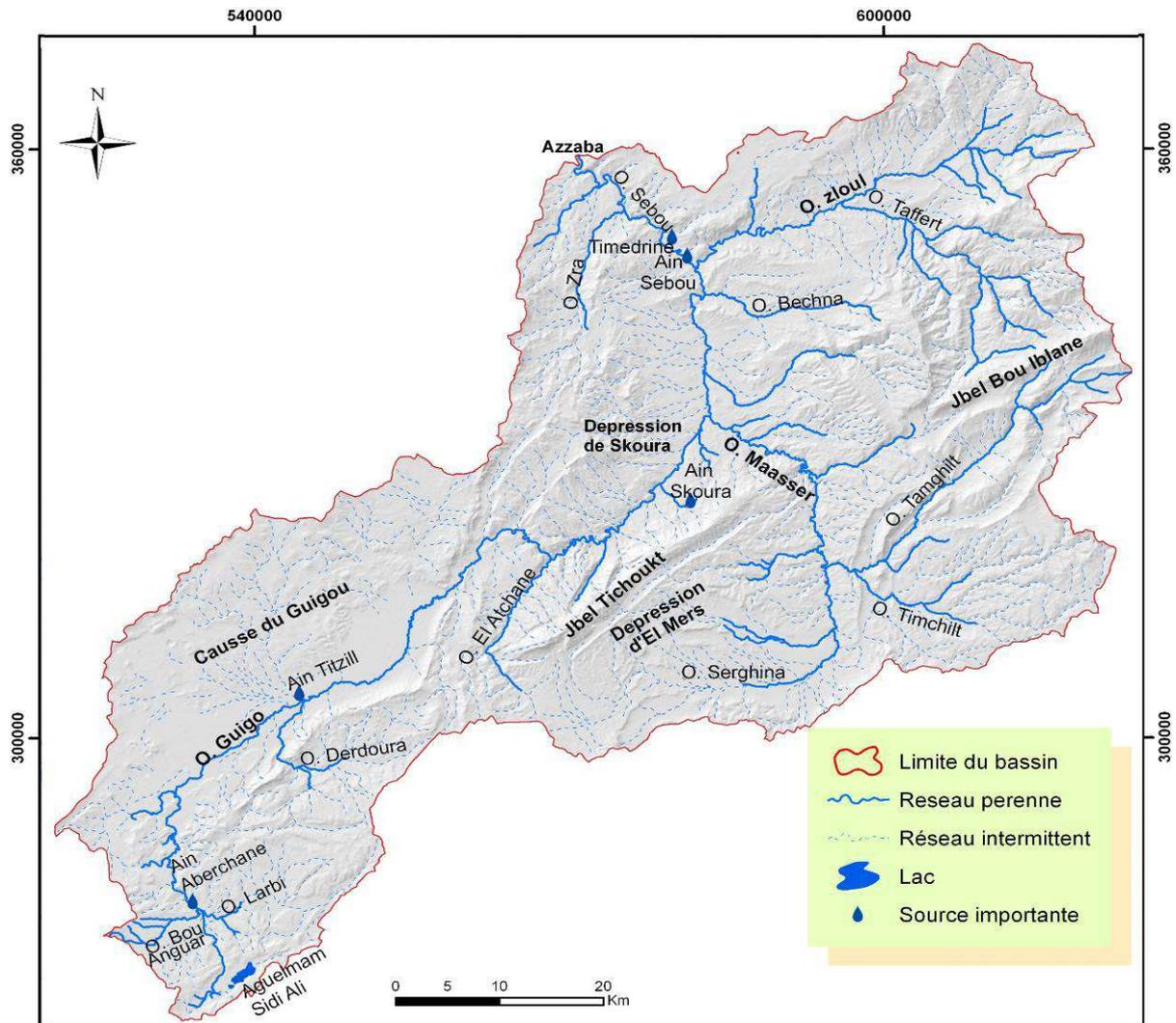
Le réseau hydrographique se définit comme étant l'ensemble des drains naturels permanents ou temporaires assurant le drainage superficiel dans le bassin versant (Taous, 2003). Plusieurs facteurs conditionnent le tracé et l'organisation du réseau hydrographique et ainsi la densité de drainage. Il s'agit de la lithologie, la tectonique, la structure du relief... . En conséquence, l'état actuel du réseau hydrographique résulte d'une longue évolution

géomorphologique. Comme tout paramètre du milieu naturel, un réseau hydrographique est en constante évolution. Sous l'influence de contraintes d'ordre géologique ou climatique (ou même anthropique), les structures de drainage changent au cours du temps et modifient plus ou moins profondément le paysage (Losson, 2003).

1- Le cours principal

Martin (1981) considère l'oued Guigou comme le Haut Sebou : « sa source se situe à Arhbalou-Larbi au fond de la plaine de Selrherte au NE du synclinal de Bou Anguar, à 2030 m d'altitude environ » (fig.2.10). Le Haut Sebou change de nom de l'amont vers l'aval (Sary & Akdim, 2000) :

- L'oued Guigou (de la source jusqu'à la confluence avec l'oued Maâsser) traverse d'abord la zone plissée jusqu'à Timahdite, où il reçoit l'oued Larbi comme affluent de rive droite. Le Guigou devient cependant pérenne à partir de la source d'Aberchane. Puis il emprunte la longue plaine du Guigou, zone de transit et de consommation de l'eau, jusqu'à Aït Khabache où il y a une station hydrométrique. Dans ce tronçon, le débit est encore gonflé par les apports d'Ain Tit Zil. Après Aït Khabach, l'oued Guigou pénètre dans la zone plissée et longe le versant nord du jbel Tichoukt.
- De la confluence avec l'oued Maâsser jusqu'à la confluence avec l'oued Zloul, le Guigou devient l'oued Mdez. Dans ce tronçon l'oued conflue avec son premier grand affluent de rive droite, le Maâsser, qui draine un bassin de 1300 km². Après l'apport de petits affluents (Beni Alaham, Bechna), il reçoit l'oued Zloul qui est considéré comme un affluent important ; Il draine un bassin de 750 km².
- Enfin, de la confluence avec l'oued Zloul jusqu'à la station d'Azzaba il devient l'oued Sebou. Après la confluence avec la source vaclusienne d'Ain Sebou, à deux kilomètres en aval il est alimenté par deux autres sources (Ain Timedrine et Ain Ouamander). Au contraire des autres tronçons, l'oued Sebou n'a aucun affluent important jusqu'à l'exutoire du bassin à Azzaba, exutoire de notre zone d'étude.

Figure 2.10: Carte du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique traduit clairement les contrastes de milieux caractérisant le bassin du Haut Sebou, pour lequel on note une opposition entre l'amont et l'aval ainsi qu'entre les deux rives : un réseau d'affluents indigents dans la cause qui témoigne d'écoulement souterrains prépondérants et à l'aval un réseau hydrographique dense bénéficiant du môle pluviométrique du massif de Bou Iblane et du complexe des sources (Ain Sebou, Ain Timedrine et Ain Ouamander) ; Ceci favorise la concentration et la pérennité des écoulements superficiels.

2- La densité de drainage

La densité de drainage d'un bassin est un paramètre reflétant son écoulement, la stabilité du réseau hydrographique et le type de ruissellement de surface (Llamas, 1993). Elle dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant, et

dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques (Musy & Higy 2004).

La densité de drainage (Dd) est le rapport entre la longueur totale des drains et la surface du

bassin versant :

$$Dd = \frac{\sum tx \text{ (km)}}{A \text{ (km}^2\text{)}}$$

Dans le Haut Sebou, la densité de drainage (réseau permanent et temporaire) est de l'ordre de 2 km/km² (tab 2.4). Elle apparaît néanmoins très inégale, d'une part entre l'amont et l'aval (peu d'affluents dans la zone plissée à l'amont), et d'autre part entre les deux rives de l'oued (aucun affluent sur le causse) ; On distingue 3 parties :

- Pour le **bassin amont** (Guigou à Aït Khabach), les affleurements perméables, les calcaires et dolomies liasiques des causses, conditionnent une densité de drainage faible.

Tableau 2.4 : Densité de drainage dans le bassin versant du Haut Sebou

Bassin versant	Surface En (km ²)	Longueur de l'oued principal (km)	Densité de drainage (km / km ²) (réseau pérenne)
Guigou à Aït Khabach	1275	76	1,3
D'Aït Khabach au Pont Md'ez (Avec Maaser)	2198	62	1,9
Du pont de Mdez à Azzaba avec Zloul	1217	36	2,1
MÁASSÈR	1320	36	2,3
Zloul	760	52	2,2
Haut Sebou	4677	174	2

- Pour le **bassin médian** (d'Aït Khabach au pont de Mdez) la densité de drainage plus élevée qu'à l'amont s'explique par le fait que l'oued Guigou et l'oued Maâsser drainent des formations plutôt semi-perméables dans les larges cuvettes et synclinales.

- Pour le **bassin aval** (du pont de Mdez à Azzaba avec Zloul), ce dernier constitue la majeure partie du bassin aval, dont la densité de drainage est encore plus élevée, qui s'explique par la nature des affleurements dominants. La forte pluviosité sur les montagnes élevées qui entourent quelques parties des bassins (Jbel Bou Iblan au Jbel Tazekka) favorisent un rendement hydrologique très important, renforcé par les débits du complexe hydro-karstique sourcier d'Ain Sebou.

Planche Photos 2.2 : Diversité de la relation entre le cours d'eau et la structure morpho-structurale



1: Cañon dans une formation calcaire dominante 2: Source karstique « Sebou » 3: Plaine agricole (utilisation de l'eau) 4: Infero-flux 5: L'oued Mâassèr dans un plateau 6: Source dans une coulée basaltique 7: Torrent dans le Moyen-Atlas plissé 8: Canyon dans une formation dolomitique

3- Les profils en long

Relation entre altitude du talweg et distance à la source le profil en long permet de définir les pentes d'un cours d'eau qui du point de vue hydrologique conditionnent les vitesses d'écoulement donc les temps de concentration mais également les secteurs dans lesquels l'infiltration est favorisée (inféro-flux).

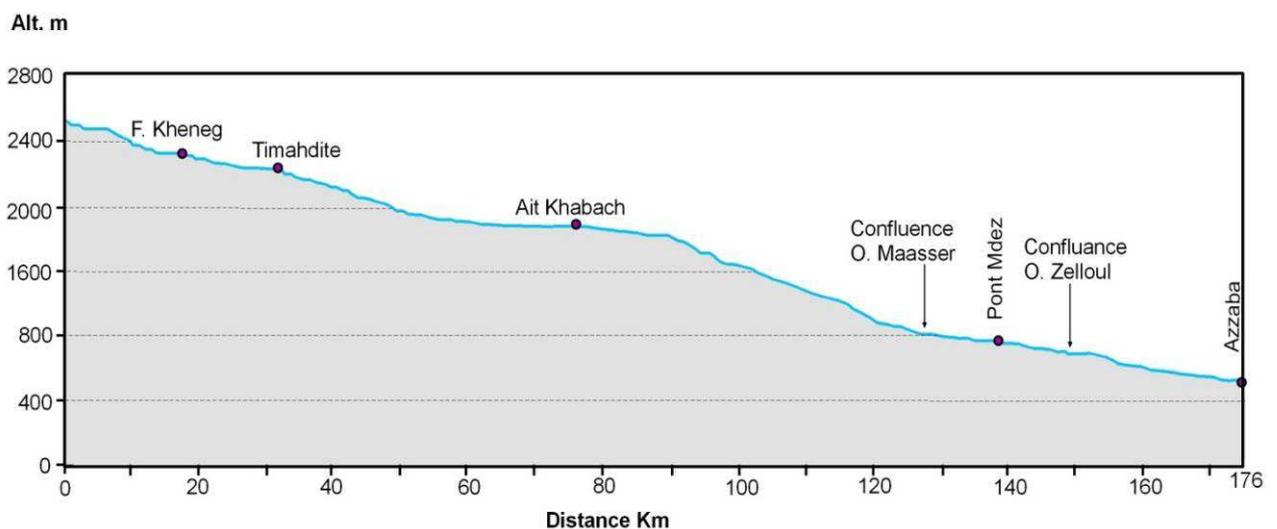
Ces profils ont été construits à partir du MNT SRTM d'une résolution spatiale de 30 mètres. Sa précision est suffisante pour déceler les variations de pente et leurs principales ruptures.

- Le profil de l'Oued Guigou-Sebou

La variation de la pente de l'Oued Guigou-Sebou dépend des conditions structurales locales. Les pentes fortes traduisent la traversée des anticlinaux avec des formes de creusement linéaire très énergique, tandis que les pentes faibles correspondent à une entaille dans les synclinaux comme dans la plaine de Guigou et la dépression de Skoura. On distingue trois tronçons.

Le tronçon amont avec une pente moyenne de 0.9% correspond à l'unité de Bou Anguar-Bakrit-Gugou (Nejjari, 2002). Dans la partie de Foug Kheneg et Timahdite l'oued Guigou entaille les formations calcaires. En revanche dans la plaine de Guigou, la pente du profil diminue progressivement vers la station d'Aït Khabach ; Sa valeur est de 0.3 %.

Figure 2.11: Profil en long de l'oued Guigou-Sebou



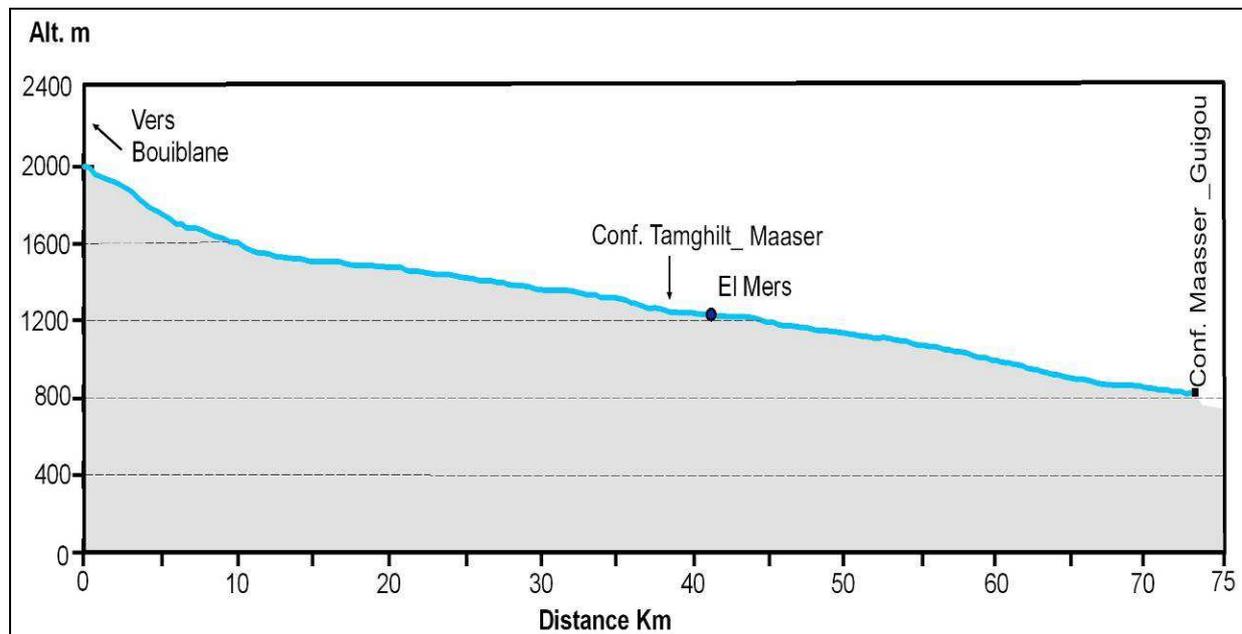
Le tronçon médian, correspond au bassin de Tarhroute (juste en aval d'Aït Khabach) et la dépression de Skoura. L'oued Guigou pénètre dans le Moyen Atlas plissé en entaillant profondément les barres de calcaires bathoniennes plissées ; La pente est forte avec une valeur de 1.3 %. A l'aval l'oued entre dans la dépression de Skoura dont le profil concave est dû à l'accumulation des dépôts des affluents de la rive droite.

Dans le tronçon aval, de la station du Pont de Mdez jusqu'à Azzaba, la pente de 0.75% est supérieure au tronçon de Skoura. L'oued Guigou-Mdez creuse et recoupe de manière efficace les formations structurales. La résistance du substratum explique l'existence des grands méandres dans ce tronçon marqué par le contact du Moyen Atlas plissé et du causse.

- Le Profil de l'Oued Mâasser

Dans le profil de l'oued Mâasser, deux tronçons sont à distinguer. Le premier est à pente forte (4,4%) avec des ruptures importantes. Les pentes de ce tronçon témoignent de l'incision linéaire qui recoupe les formations résistantes constituées essentiellement des calcaires du Bathonien. Dans le deuxième tronçon vers l'aval (Fig 2.12), les pentes sont plus faibles (1.3 %) Ici l'oued prend le profil d'une très large vallée d'inondation.

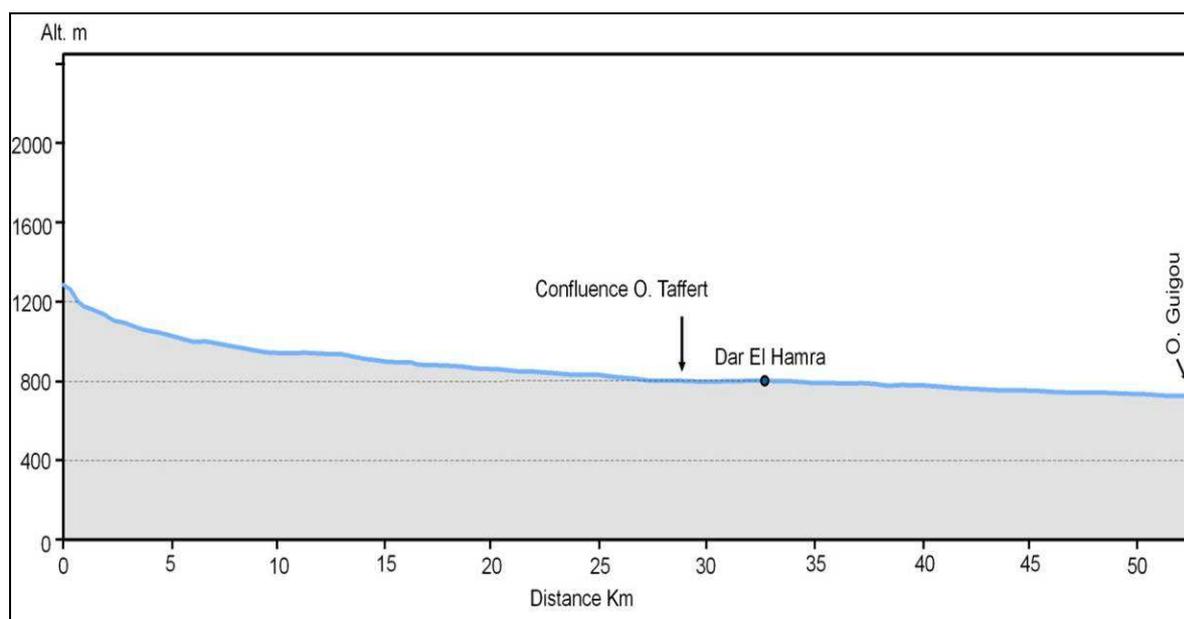
Figure 2.12 : Profil en long de l'oued Maâsser



- Le profil en long de l'Oued Zloul

L'Oued Zloul et son principal affluent le Taffert prennent naissance dans la zone montagneuse du Moyen Atlas plissé. Le profil se caractérise par des pentes fortes (3,6 %), entraînant une évacuation rapide des eaux (Nejjari, 2002). Vers l'aval, dans la dépression de Zloul, les pentes s'adoucissent dans les terrains tendres et imperméables du Toarcien-Bajocien.

Figure 2.13 : Profil en long de l'oued Zloul



Conclusion du chapitre 2

Au terme de ce chapitre, nous sommes arrivés à la mise en évidence des caractéristiques morphométriques du bassin versant, où les indices varient légèrement d'un sous-bassin à l'autre. En revanche, les données de l'hypsométrie et de la pente du bassin montrent une grande diversité entre les sous bassins. En effet, les contrastes altitudinaux influencent les autres paramètres et conditionnent la ressource en eau ; Il s'agit notamment des précipitations, des températures et du couvert végétal. La diversité de la topographie commande également l'installation humaine et les activités exercées, où les cuvettes et les plaines sont exploitées par l'agriculture et les montagnes sont des sites préférés pour l'élevage.

Ce chapitre a par ailleurs permis de souligner, au travers de la présentation du domaine d'étude, les contrastes géologiques des bassins étudiés. Cette diversité au niveau de la lithologie et de la perméabilité influence le comportement hydrologique et les modalités des

écoulements, ainsi que l'alimentation des cours d'eau. La nature karstique perméable dominant le Haut Sebou et le Moyen Atlas en général offre des potentialités importantes en matière des ressources en eau.

****Chapitre 3 : Les apports au système hydrologique**

Sommaire

Introduction

I- Le contexte climatique

II- Les précipitations

1- Les données pluviométriques

1.1- La critique des données

1.2- Le comblement des lacunes

2- La variabilité temporelle des précipitations

2.1- Le régime des précipitations

2.1.1- La variabilité annuelle

2.1.2- Analyse fréquentielle des précipitations annuelles

3- La spatialisation des pluies dans le bassin versant du Haut Sebou

3.1- Définition de régions pluviométriques homogènes : méthode VR

3.2- Définition et extraction des variables prédictives

3.3- Définition du modèle

3.4- Résultats en interannuels : chronique 1974/2010

3.5- Les résultats du modèle à l'échelle annuelle et mensuelle

3.6- La méthode de "l'inverse des distances"

III- L'évapotranspiration potentielle et réelle

1- L'ETP et l'ETR dérivées de l'imagerie satellitale

2- La spatialisation de l'ETP

3- L'ETR

4- Estimation de la pluie efficace sur le bassin versant

Conclusion

Introduction du chapitre 3

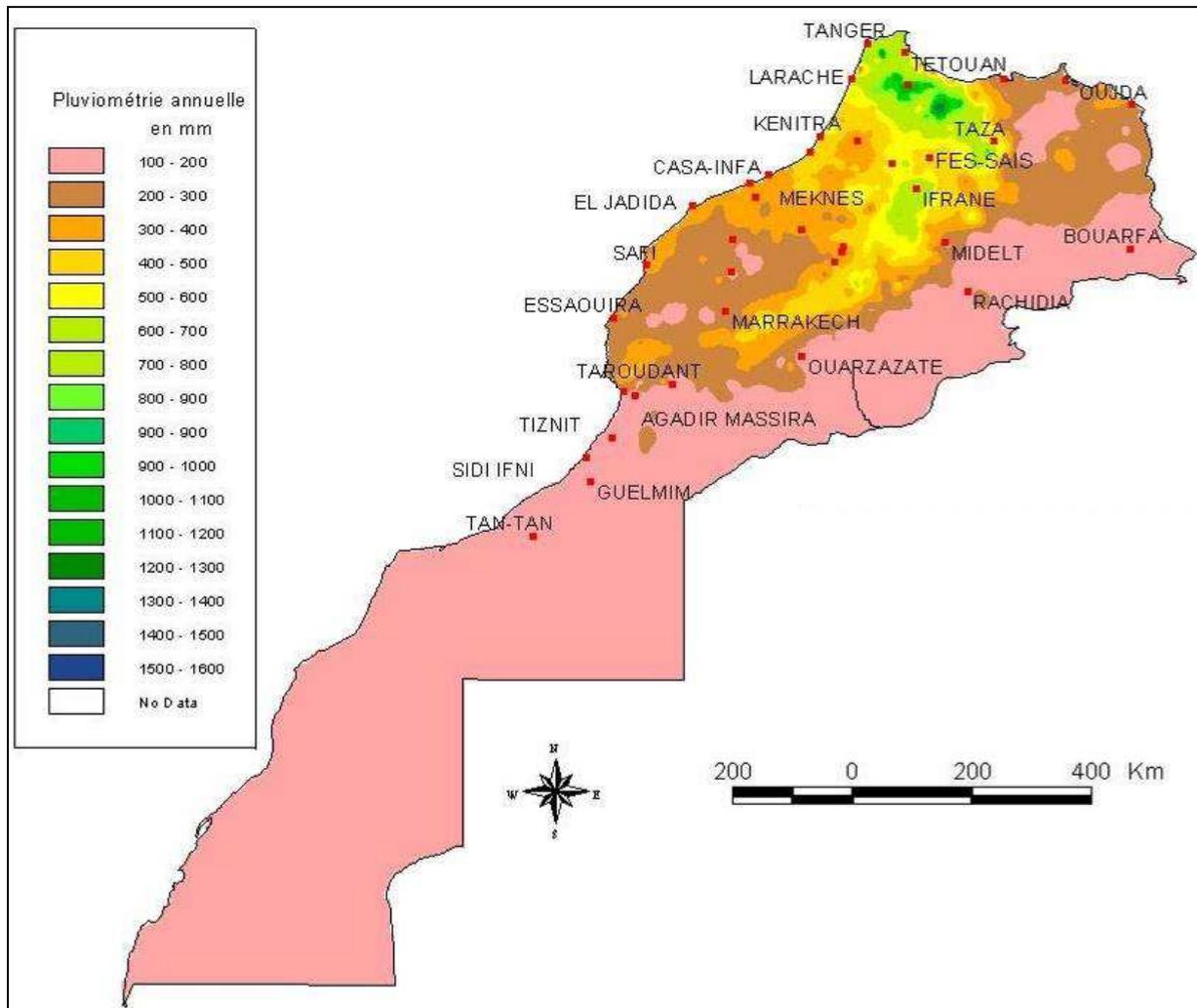
Les apports au système hydrologique résultent de la balance hydrique mettant en jeu d'une part les précipitations brutes recueillies par le pluviographe (P) et d'autre part les prélèvements par évaporation physique et transpiration des végétaux (ETR). Le résultat positif de ce bilan (P-ETR) représente l'eau effectivement utile à l'écoulement libre soit directement, par écoulement rapide de crue, soit indirectement, en transitant par les aquifères (zone non saturée puis saturée).

L'objet de ce chapitre est donc la quantification spatiale des précipitations et de l'ETR. Compte tenu de l'étendu du bassin versant mais surtout de son contexte montagnard qui génère une importante variabilité spatiale des variables climatiques, l'objectif poursuivi dans ce travail nécessite un nombre important de données relatives à l'ensemble des composantes du cycle de l'eau. Le recueil de ces données brutes, préalable à toute démarche scientifique, a constitué un grand défi dans le contexte marocain où les services de l'Etat sont peu enclins à les diffuser. Néanmoins à force de persévérance les données de précipitations, de température et d'évaporation ont été collectées (tab.3.1, 3.6) pour quasiment tous les postes existants dans et à proximité du bassin versant du Haut Sebou.

I- Le contexte climatique

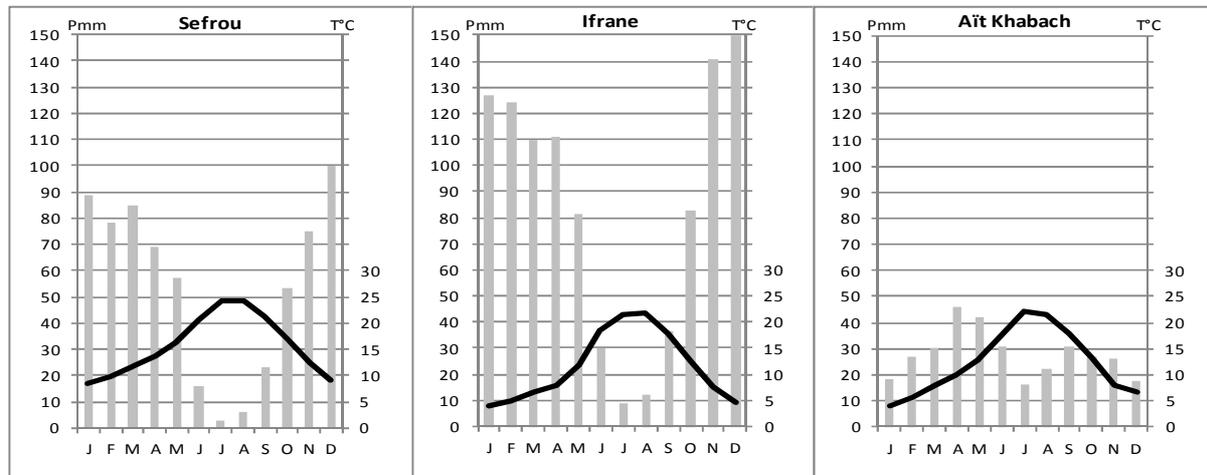
Le bassin versant du Haut Sebou s'inscrit dans un contexte climatique méditerranéen de montagne à hiver froid (fig.3.1). Néanmoins le compartimentage morpho-structural du Moyen Atlas (cf. 2^{ème} chapitre), son orientation SO-NE (effet mixte de zonalité et de continentalisation) et son exposition aux flux déterminent aussi un compartimentage bioclimatique (Nejjari et al., 2000)

Figure 3.1 : Pluviométrie moyenne annuelle du Maroc (source : Météo Maroc, <http://www.marocmeteo.ma>)



Globalement, le bassin du Haut Sebou se trouve dans une zone de transition d'un point de vue climatique. A l'Ouest du bassin le climat est plutôt humide avec d'importantes précipitations sur le Causse Moyen-atlasique (Ifrane, Azrou). Les hauts reliefs peuvent recevoir une lame précipitée supérieure à 1000 mm. Les cuvettes comme la plaine du Guigou ou encore le bassin du Maâsser sont considérées sous influence semi-aride avec des précipitations avoisinant les 500 à 600 mm du fait de la protection des reliefs (Ait Khabbach, Sefrou) avec néanmoins des distinctions à identifier. Ces nuances climatiques au sein du bassin versant découlent des différentes morphologies du relief ainsi que du phénomène de continentalisation (fig.3.2).

Figure 3.2 : Courbes ombrothermiques représentatives de 3 ambiances climatiques du bassin versant du Haut Sebou (source : Service géologique du Maroc, 1977)



II- Les précipitations

L'analyse des précipitations a pour objectif l'estimation des volumes précipités susceptibles d'alimenter les bassins (ressource en eau de surface et souterraine). Or, comme tout processus naturel, les pluies sont soumises à une variabilité spatio-temporelle qu'il est nécessaire de cerner pour une estimation précise.

La démarche adoptée repose sur trois points : détermination d'une ou plusieurs régions pluviométriques homogènes en vue de la spatialisation des pluies, détermination de la variabilité temporelle (échelle interannuelle, annuelle et mensuelle) et spatialisation des précipitations aux différentes échelles de temps.

1- Les données pluviométriques

Les précipitations, dont le processus débute dans l'atmosphère lorsque l'eau est sous forme de vapeur, constituent les conditions aux limites des divers cheminements terrestres de l'eau, de la surface des sols jusqu'aux rivières (Anctil et al., 2005). Dans le même ordre d'idée, Serra (1952) souligne que le météorologiste considère la pluie comme un élément descriptif du climat qu'il étudie. Il a besoin de savoir combien à une station il tombe d'eau dans l'année, sous quelle forme, solide ou liquide, elle arrive au sol et quelle en est la répartition saisonnière ou mensuelle. Les précipitations constituent de ce fait la matière première des débits des cours d'eau (Roche, 1969).

Le réseau stationnel continue d'être la base essentielle pour l'étude de la variabilité spatiale, saisonnière et interannuelle des précipitations terrestres (Willmott et al., 1994). À cet égard,

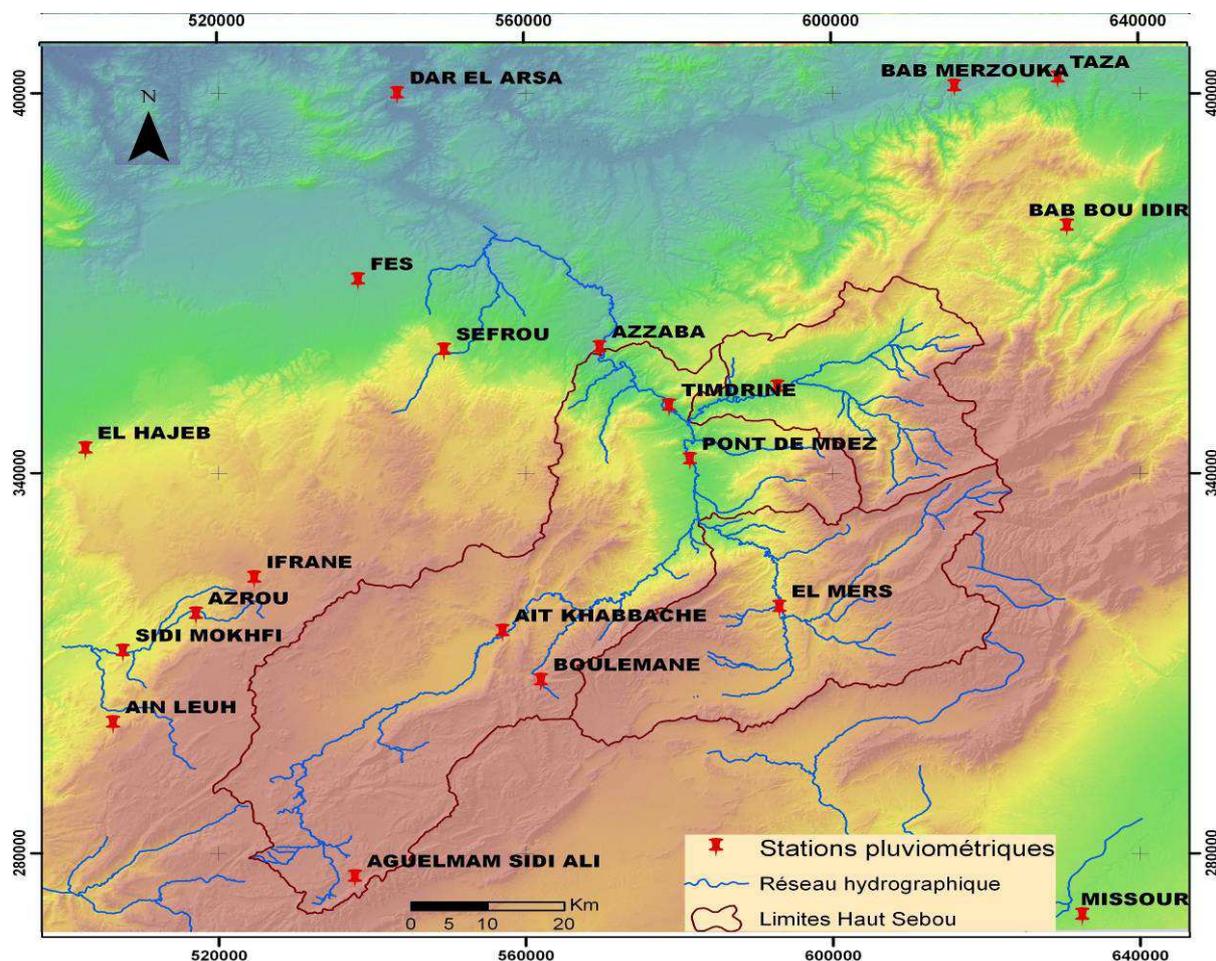
ce travail se focalise sur des analyses statistiques approfondies, ce qui exige à la fois des séries suffisamment longues sur un nombre de stations suffisant. Le recensement des postes pluviométriques à partir des informations des divers services de l'état fait état de huit stations pluviométriques dans le bassin versant, et d'une vingtaine à proximité (chronogramme en annexe 3.1). La majeure partie des données collectées, de l'ordre de 90%, proviennent de l'Agence Hydraulique du Bassin du Sebou (ABHS). Les autres données proviennent des directions provinciales de l'agriculture et des services des eaux et forêts. La variabilité de la qualité et des durées des chroniques a nécessité un choix des stations basé sur trois critères : la durée de la chronique, l'importance des lacunes dans celle-ci ainsi que leur position géographique par rapport au bassin. Au final 26 stations sont retenues (fig.3.3 et tab. 3.1). La chronique commune pour la plupart des stations est 1974/75 à 2009/2010, de ce fait elle constitue la période de référence à ce travail.

Tableau 3.1 : Localisation et date de mise en service des 26 stations retenues

<i>Stations</i>	<i>Date M.S</i>	<i>Altitudes (m)</i>	<i>Lambert X</i>	<i>Lambert Y</i>
<i>Stations dans le bassin</i>				
Aguelmam Sidi Ali	75-78	2078	537800	276000
Aït Khabach	70-71	1478	557000	314800
Ain timedrine	57-58	642	578700	350350
Azzaba	57-58	516	569650	359570
Boulemane	47-48	1724	562000	307000
Dar El Hamra	79-80	830	592800	353350
El Mers	79-80	1230	593100	318620
Pont Mdez	58-59	725	581400	341900
<i>Stations autour du bassin</i>				
Ain Bétit	74-75	1007	502700	343600
Ain Louh	50-51	1430	506300	300300
Azrou	23-24	1279	517100	317500
Bab boudir	74-75	1568	630500	378800
Bab Marzouka	70-71	368	615840	400840
Bab Ouander	56-57	312	579500	440112
Dar El Arsa	73-74	138	543300	399700
Idriss Iér	-	559	559721	396056
El Hajeb	14-15	1005	502700	343600
Fés	14-15	569	538200	370300
Fés DRH	-	540	540422	373066
Galez	75-76	214	553726	439212
Ifrane	56-57	1648	524700	323200
Missour	71-72	873	632500	270000
Meknes	31-32	487,50	487500	365000
Sefrou	14-15	930	549370	359200
Sidi Moukhfi	75-76	1075	507584	311631
Taza	31-32	629,30	629300	402200

La densité de stations au sein du bassin de 1 pour 500 km² est relativement faible, surtout compte tenu de la forte variabilité pluviométrique existante du fait du contexte montagnard (cf. 1^{er} chapitre). Qui plus est la répartition spatiale des données périphériques au bassin (carte 3.3) montre clairement une dissymétrie est/ouest : il n'y a qu'une station vers l'est sur laquelle s'appuyer pour rendre compte du gradient pluviométrique entre le bassin et la vallée de la Moulouya. La configuration du réseau de mesure pluviométrique est donc loin d'être idéal dans le cadre d'une spatialisation des pluies.

Figure 3.3 : Localisation des stations pluviométriques



1-1- La critique des données

De nombreux chercheurs recommandent avant toute analyse de données ou de traitement statistique même très simple, de faire une critique et un traitement primaire des données brutes captées par un observateur ou un instrument de mesures. Castellani (1986) souligne que « toute étude statistique doit avant tout s'appuyer sur un réseau d'informations fiables et contrôlées, le contrôle des séries retenues est une étape préalable à toute analyse ». A cet égard, la première phase d'une étude consistera donc à faire un inventaire de l'information

historique (Ouarda & al, 1998 ; Miquel, 1984), ayant pour ambition de réaliser une analyse critique afin de s'assurer de la cohérence des données au niveau régional. Donc pour faciliter cette tâche il faut se poser des questions comme : où sont les principales sources de l'information pour notre étude ? Ces séries historiques sont-elles précises (fiables) ? Sont-elles exhaustives (représentatives) ? Forment-elles un échantillon homogène ? Présentent-elles bien une stationnarité ? Est-il nécessaire de procéder à un découpage d'échantillons ? (Alfonso, 2003).

Dans un premier temps le test graphique des simple et double cumuls des totaux pluviométriques annuels (Escourou, 1978) a été appliqué afin de détecter d'éventuelle anomalie dans une série de données (figure 3.4).

Figure 3.4 : Méthode du simple cumul

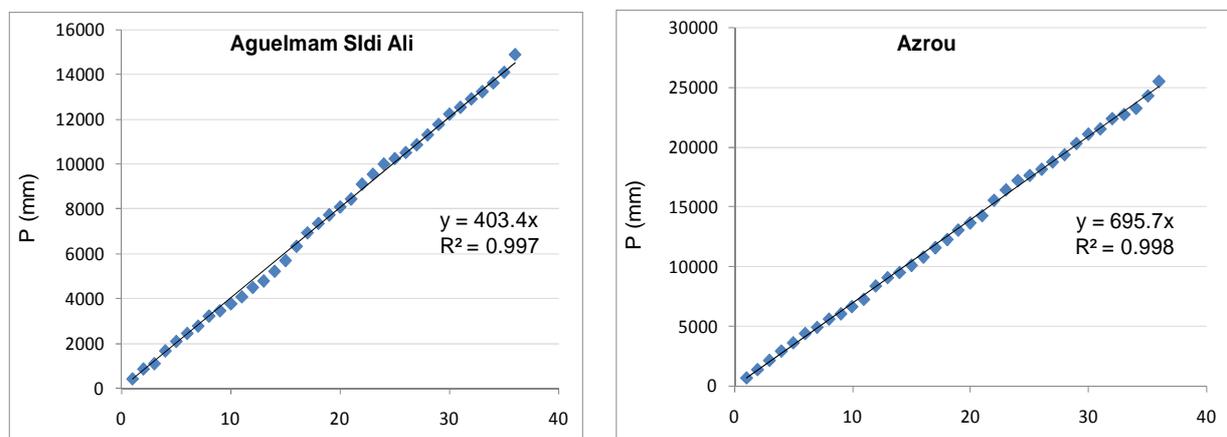
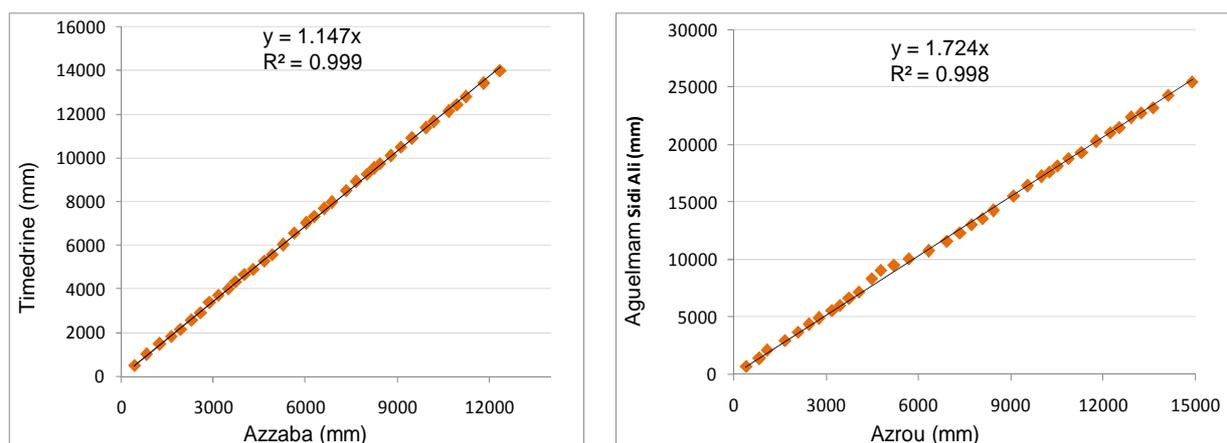


Figure 3.5 : Méthode du double cumul

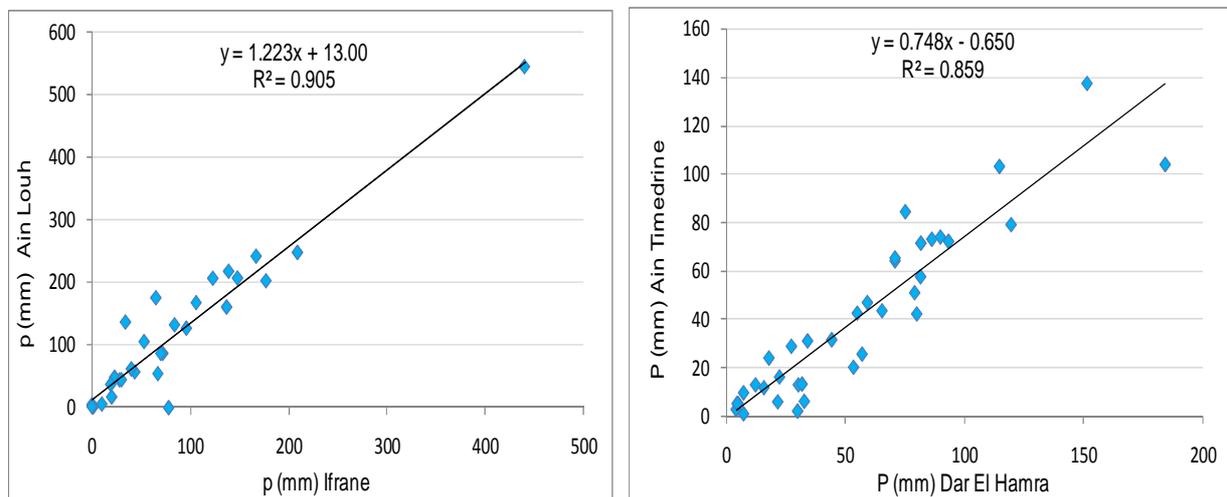


La pente de la droite et le coefficient de détermination (R^2) obtenus de ces graphiques permettent de constater que les relations entre les valeurs des stations sont de bonne qualité.

1-2- Le comblement des lacunes

Il est fréquent qu'à cause d'un bris d'appareil ou d'une autre circonstance fortuite, il manque des données dans un enregistrement continu. Il est alors souvent nécessaire d'estimer celles-ci pour compléter la série (Anctil et al., 2005 ; Beaulieu et al., 2007). Les données manquantes dans les séries ont été complétées par la méthode des corrélations (Dubreuil, 1974). Elle consiste à vérifier des chroniques de précipitations classiques par corrélations poste par poste et mois par mois. Le coefficient de détermination (R^2) juge de sa qualité et l'équation de la droite de corrélation est utilisée pour combler les lacunes (El Ghachi, 2007). Tant que R^2 est supérieur à 70%, la corrélation peut être considérée comme satisfaisante ; à plus de 80% la corrélation est bonne.

Figure 3.6 : Exemple de corrélation mensuelle



Cette opération a permis la reconstitution des dizaines de mois, avec un R^2 qui dépasse le seuil de 70%.

2- La variabilité temporelle des précipitations

Comme tout processus naturel, les pluies sont soumises à une variabilité spatio-temporelle qu'il est nécessaire de cerner pour une estimation précise. Ceci est d'autant plus vrai que les traits climatiques semi-arides voire arides dominent sur la plus grande partie de la région d'étude et font en sorte que les ressources renouvelables en eaux superficielles sont très irrégulières dans le temps et dans l'espace, car la circulation de l'eau dans un bassin est entièrement gouvernée par la distribution spatiale et temporelle des précipitations. Dans cette optique, l'étude de la variabilité des précipitations *in situ* est indispensable pour caractériser la répartition spatiale et temporelle des hauteurs pluviométriques à l'échelle du bassin versant.

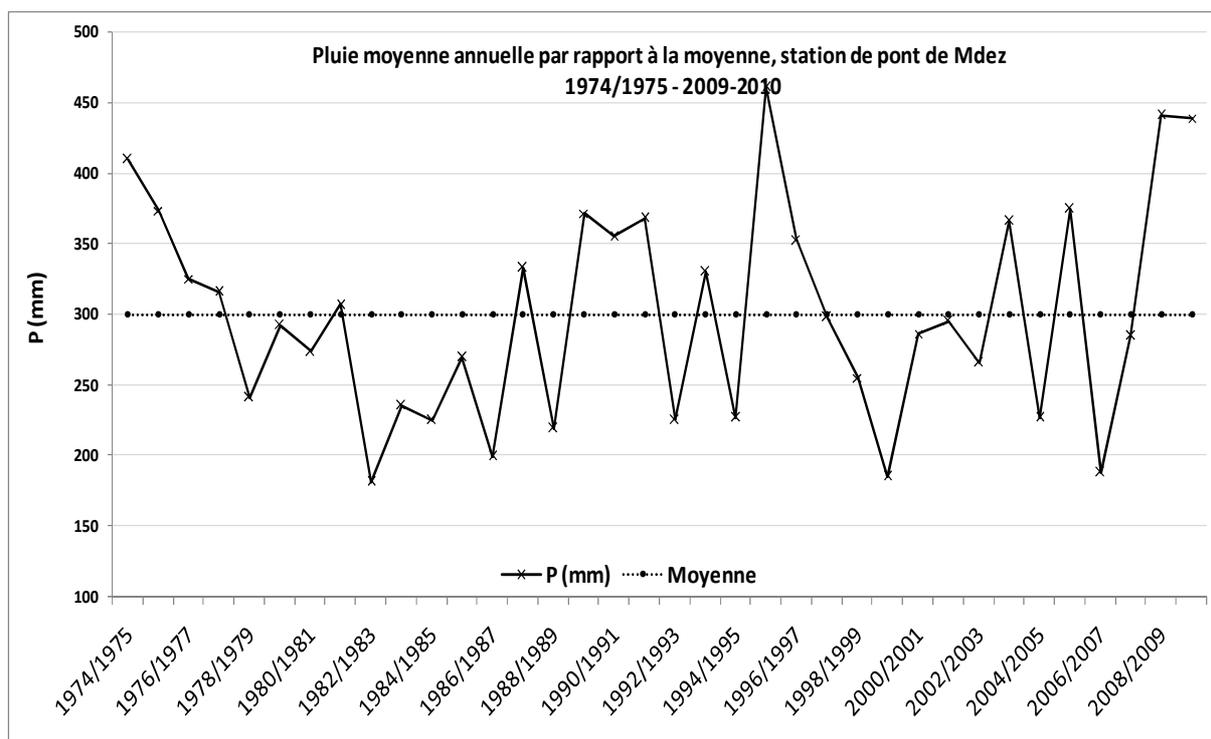
Obda (2004) souligne qu'il y a plusieurs expressions pour calculer le degré de la variabilité temporelle des précipitations : le coefficient de variation, l'intervalle de variation, l'écart absolu moyen, les déciles, les quantiles, le coefficient d'irrégularité K3, l'analyse fréquentielle, les calculs des périodes de retour, etc...

2-1- Le régime des précipitations

2-1-1- La variabilité annuelle

La variabilité annuelle des précipitations dans le bassin du Haut Sebou est mise en évidence à partir des données de 3 stations représentatives respectivement de la partie amont, médiane et aval du bassin : Aguelmam Sidi Ali, Aït Khabach et Pont de Mdez. Sur la chronique de référence les moyennes annuelles des précipitations sont respectivement 413 mm, 356 mm et 299 mm (figure 3.7 et annexe 3.6) Compte tenu de la finalité hydrologique de ce travail les totaux pluviométriques sont calculés de septembre à août, soit une année hydrologique.

Figure 3.7 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Mdez



La variabilité annuelle des précipitations, conséquente, est croissante de l'amont vers l'aval ; Le coefficient de variation est de 25% à pont de Mdez et 30% à Aguelmam Sidi Ali (tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Caractéristiques statistiques des 3 Stations

Station	Moyenne P (mm)	Max P (mm)	Min P (mm)	Ecartype	C. de variation	Nb d'années humides	Nb d'années sèches
Aguelmam Sidi Ali	413	789	238	137	30%	16	19
Aït Khabach	356	632	188	114	29%	17	18
Pont Mdez	299	460	181	80	25%	16	19

Du point de vue hydrologique la variabilité brute ne rend pas compte de l'aspect cumulatif croissant ou décroissant des stocks d'eau dans le bassin que met en évidence des séries de faibles ou de fortes pluies.

Cet aspect de la variabilité peut être abordé notamment par la méthode du CUSUM (Brunet-Moret, 1971 ; Lettenmayer, 1976) dont l'objectif est de déterminer l'hétérogénéité interne de la série étudiée en se fondant sur la définition d'un intervalle de confiance (bande passante C_j) (François et al, 1993). Méthode statistique issue de la méthode du simple cumul, elle caractérise aussi la période étudiée en définissant le nombre d'années sèches, d'années humides et en détectant les sauts de moyenne, dérives, etc... (Lang, 2007). La valeur C_j est calculée pour chaque année, la courbe résultante représente le cumul des écarts normés par

$$C_j = \sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})$$

rapport à la droite de la référence. La méthode de CUSUM s'appuie sur le calcul de :

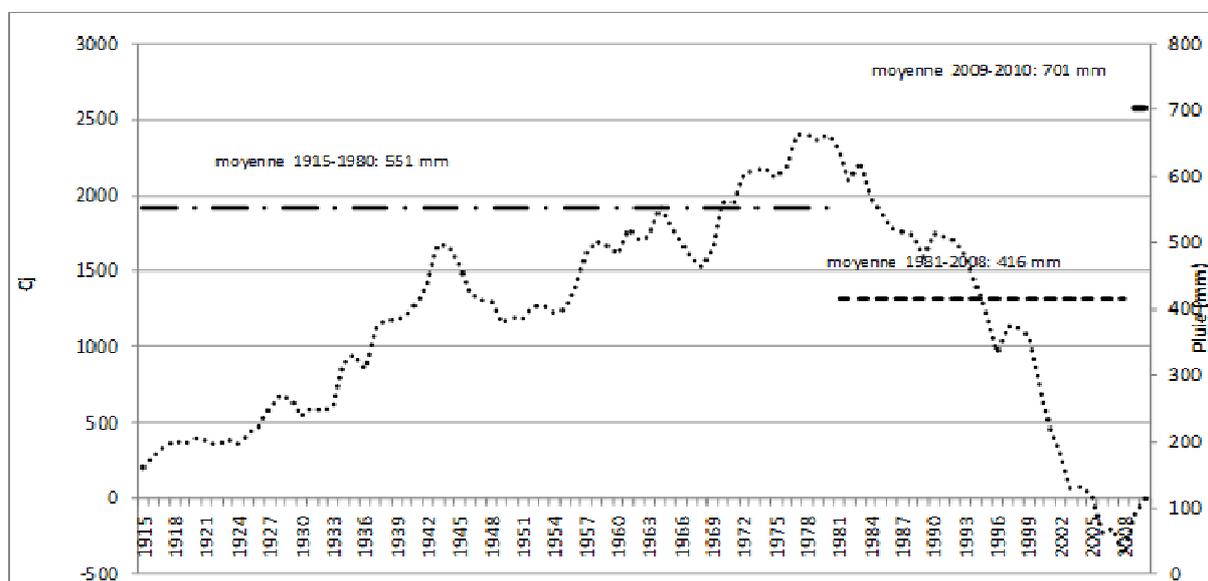
où X_j , \bar{X} et n correspondent respectivement à la pluie annuelle, la moyenne pluviométrique de la période étudiée et n le nombre d'années jusqu'à l'année i .

La méthode du CUSUM, par la variable C_j illustre très clairement les tendances sèches et humides du climat depuis le début du siècle dernier pour les données de la station de Fès ; Pour aller plus loin dans la recherche des tendances, la méthode de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989) a été appliquée à partir du logiciel « Khronostat ». Elle découpe la chronique 1915-2010 en trois séries pluviométriques homogènes de moyenne contrastée : 551 mm pour la période 1915-1980, 416 mm pour la période 1981-2008 et 701mm pour la période 2009-2010 (tab.3.3 et fig.3.8).

Tableau 3.3 : Résultat du découpage des données de pluies annuelles de la station de Fès par la méthode de segmentation de Hubert

Périodes	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	Nbre années	diagnostic
1914-15/ 2009-10	516,68	134,64	95	Série hétérogène
1914-15/1979-80	551,32	107,91	65	Série homogène
1980-81/2007- 08	416,04	130,60	27	Série homogène
2008- 09/2009-10	782,55	10,67	2	Série homogène

Ces méthodes de segmentation de longues séries représentatives du climat du Moyen-Atlas ont déjà appliquées notamment par Nejjari (2001), Gille et François (2001), Sary et Akdim (2001) et Obda (2004). Bien que la chronique utilisée s'arrêta au milieu de la décennie 1990 ces auteurs insistaient sur l'ampleur sans précédent de la sécheresse par son aspect cumulatif des déficits sur près de 15 ans. Les nouveaux chiffres montrent que cette sécheresse a finalement duré quasiment 30 ans puisque seule l'année 2009 semble marquée une inversion significative de la tendance. Sur les 30 années de sécheresse la deuxième moitié a été encore plus déficitaire avec 416 mm pour 1981-2008 et 431 mm pour 1981-1995 (Nejjari, 2001).

Figure 3.8 : CUSUM des précipitations à la station de Fès et moyenne pour les 3 périodes homogènes

Il est intéressant de constater que les périodes pour lesquelles les débits ponctuels ont été mesurés sur les différents cours d'eau du bassin du Haut Sebou sont les plus contrastées : 416 mm pour la fin des années 1990 et 701 mm pour l'année 2009-2010.

2-1-2-Analyse fréquentielle des précipitations annuelles

Un autre moyen de scruter la variabilité d'une série de données et l'approche fréquentielle. Elle permet également l'analyse de l'occurrence d'événements extrêmes ayant une portée probabiliste pour les événements futurs (Meylon et al., 2008 ; Giret, 2007). Cet aspect prédictif des résultats est fort intéressant pour ce travail portant sur la gestion de la ressource en eau.

D'un point de vue méthodologique, l'étude fréquentielle passe d'abord par l'arrangement des valeurs de l'échantillon par ordre croissant en donnant à chaque variable son rang dans la série. Ensuite, nous calculons la fréquence expérimentale des variables :

$$F = (r - 0.3) / (N + 0.4)$$

Avec : r : le rang de chaque valeur. N : l'effectif de l'échantillon

Les données de 5 stations situées dans le bassin versant ont été ajustées à 6 lois statistiques: loi Normale, loi Log-Normale, loi Gumbel, loi Pearson Type III, loi Log Pearson Type III et la loi de Weibul. Le test d'ajustement des répartitions empiriques et théoriques est fait par le test d'adéquation du Khi2.

Le meilleur ajustement est obtenu par la loi Ln-Normale (fig.3.9 et annexe 3.7)

Figure 3.9 : Ajustement statistique des pluies annuelles à la station de Boulmane

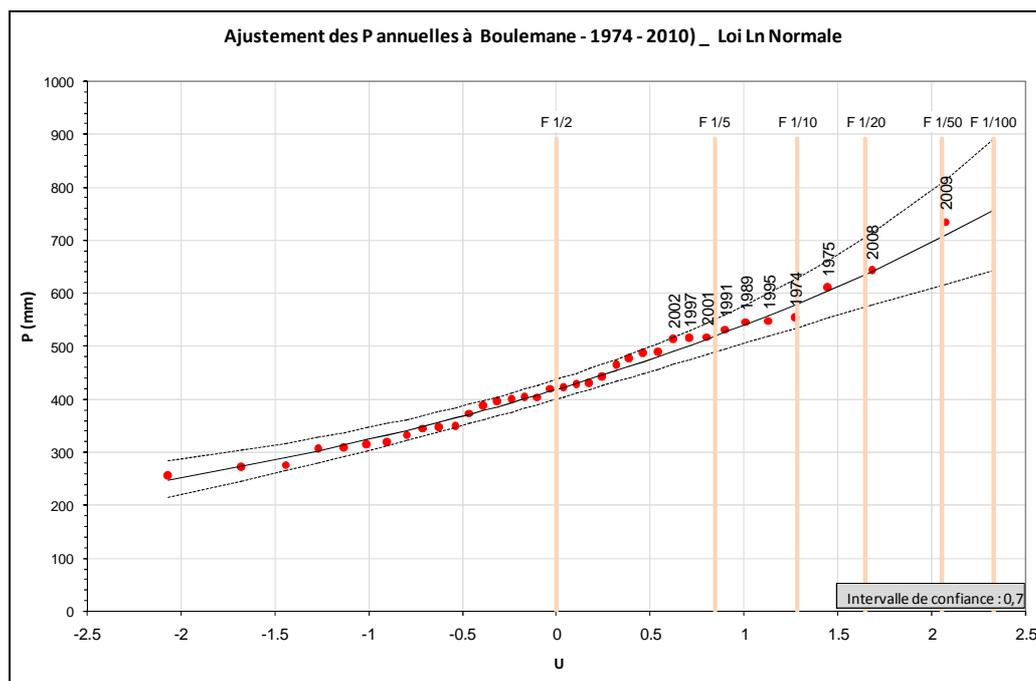


Tableau 3.4 : Précipitations annuelles fréquentielles pour la période (1974-2010), loi Ln-Normale

Fréquence	« Vers le sec »					1/2	« Vers l'humide »				
	1/100	1/50	1/20	1/10	1/5		1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
Temps de	100ans	50ans	20ans	10ans	5ans	2ans	5 ans	10ans	20ans	50ans	100a
Station d'Aguelmam Sii Ali	206	222	250	277	313	397	504	571	633	710	767
Station d'Aït Khabach	173	187	211	235	267	342	438	499	555	626	678
Station de Boulemane	231	248	275	302	338	419	519	580	637	706	757
Station d'El Mers	227	243	270	297	333	414	515	578	635	706	757
Station Dar El Hamra	252	270	298	326	364	448	552	615	673	744	796
Station du Pont Mdez	160	171	190	209	234	290	360	403	443	492	527

Les résultats de l'étude fréquentielle (tab.3.4) mettent en évidence la position limite de certains territoires du bassin par rapport à l'aridité. En effet, la station d'Aït Khabach qui caractérise le climat de la plaine du Guigou est proche de l'aridité absolu 1 année sur 5. Il en est de même pour la station de pont de Mdez qui caractérise la partie médiane du cours du Sebou (dans les limites considérées). Globalement, mis à part le nord-est, 1 année sur 20 c'est l'ensemble du bassin qui bascule dans un climat aride.

3- La spatialisation des pluies dans le bassin versant du Haut Sebou

La connaissance du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant est tributaire d'une quantification spatialisée des précipitations la plus représentative possible de la réalité. Les pluviomètres ou les stations météorologiques qui enregistrent les données pluviométriques constituent un réseau de mesure lâche. La spatialisation des pluies est étroitement dépendante du « type de modèle et de son mode de gestion géographique » (Ly & al., 2012). A cet égard de nombreuses méthodes existent, issues de la statistique spatiale ou de modèle mettant en relation la variable à expliquer et des variables explicatives.

Le problème majeur pour une connaissance fine de la quantification spatiale des pluies, quelque soit la méthode de spatialisation est la disponibilité de la donnée. Ce problème est

d'autant plus crucial que nous sommes en domaine montagnard pour lequel la spatialisation est d'autant plus difficile du fait de la complexité de la topographie notamment. La topographie conditionne la structure spatiale des pluies par l'effet orographique du fait de l'ascension des masses d'air, le refroidissement adiabatique induisant la condensation de l'air humide sur les versants au vent (Chow et al., 1988) ; Globalement on observe donc une augmentation des précipitations conjointement avec l'altitude. Néanmoins la relation entre précipitation et élévation est complexe et dépend de la façon dont la région est exposée aux vents dominants et des conditions synoptiques ; En fonction de la direction des vents dominants des secteurs peuvent être caractérisés par moins de précipitation (ombre pluviométrique) si les pluies sont plus importantes au niveau des crêtes, versant sous le vent. De plus, dans le cadre d'une modélisation hydrologique la difficulté de reproduire correctement le champs pluviométrique génère des problèmes dans la réponse hydrologique dans le modèle qui est sensible au volume d'entrée (Nicotina et al., 2008).

Une dizaine de méthodes de spatialisation des pluies annuelles sur le bassin du Haut Sebou ont été réalisées et comparées par Nejjari (2002). Nous basant sur les conclusions de ce test nous avons fait le choix de mettre en place un modèle prédictif mettant en relation les précipitations avec des variables explicatives. En effet, les Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.), couplé aux nombreuses données issues des images d'observations de la terre permettent la réalisation de modèle pluviométrique en utilisant les relations qui existent entre la pluviométrie et des données explicatives de cette dernière, comme la topographie environnante du site calculée selon des directions différentes afin de tenir compte de l'anisotropie liée au vent dominant. On peut avoir recours également à des variables telles que la végétation ou l'humidité qui sont dépendantes de la pluie. Ces variables, que l'on qualifie de secondaire, sont dérivées par les méthodes de télédétection. Ce type de modèle fonctionne mieux s'il est régionalisé (François, 1997). La démarche retenue suit donc 4 étapes.

3-1- Définition de régions pluviométriques homogènes : méthode VR

La première étape de la spatialisation des précipitations, afin d'optimiser les résultats de la modélisation, vise à définir des régions pluviométriques. La méthode retenue est celle du Vecteur Régional élaborée par Hiez (1977). Elle consiste à déterminer un vecteur régional des

indices représentatifs de la pluviométrie annuelle sur une région, tout en quantifiant la contribution relative C_i de chaque station. Le vecteur régional représente donc la tendance pluviométrique la plus probable de la région considérée, sous une forme compacte (Meylan et al., 2008). Selon les mêmes auteurs le modèle utilisé est de type: $\mathbf{A} = \mathbf{B} + \mathbf{E}$ où \mathbf{A} est la matrice des observations de dimension n (nombre d'années) fois m (nombre de stations), \mathbf{B} est la matrice des données « théoriques » et \mathbf{E} la matrice des erreurs (appelées également anomalie ou résidus).

Cette méthode permet de mettre en évidence la qualité des données, elle permet aussi de comparer géographiquement et de corrélérer les données d'une station avec les autres stations les plus proches. La méthode du vecteur régional permet d'une part la critique de l'information et d'autre part sa synthèse. Cette méthode a été mise en œuvre dans le logiciel "Hydraccess" à partir des données de pluies mensuelles des 25 stations pour la période 1974-2010.

Tableau 3.5 : Coefficients de corrélation obtenus par la méthode de vecteur régional

Station	Corrélation /Vecteur	Station	Corrélation /Vecteur
AGUELMAM SIDI ALI	0.66	MISSOUR	0.41
BAB OUANDER	0.54	PONT DE MDEZ	0.82
BOULEMANE	0.72	SEFROU	0.88
DAR EL ARSA	0.90	SIDI MOKHFI	0.80
DAR EL HAMRA	0.88	TAZA	0.88
IDRISS 1	0.90	AIN LEUH	0.90
EL MERS	0.75	TIMDRINE	0.84
FES	0.34	AIT KHABBACHE	0.75
FES ABH	0.90	AZROU	0.78
GALEZ	0.76	AZZABA	0.89
IFRANE	0.94	BAB BOU IDIR	0.52
AIN BETIT	0.94	BAB MERZOUKA	0.85
MEKNES	0.65		

Au regard du seuil de 70% comme limite inférieure de R^2 , 6 stations sortent de l'échantillon (tab. 3.5) : Aguelmam Sidi Ali, Bab Ouander, Fès, Meknès, Missouri, Bab Bou Idir.

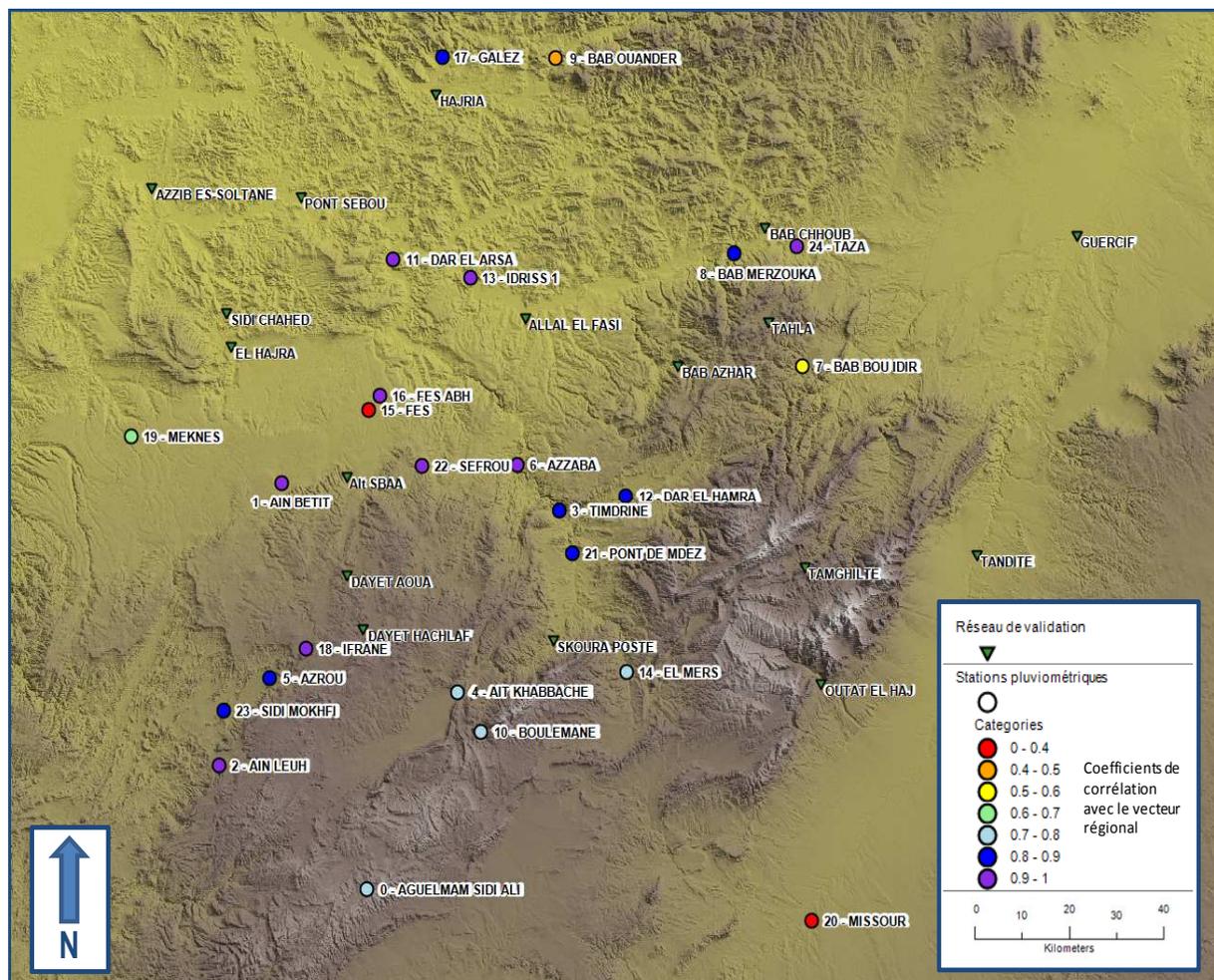
Pour les stations de Fès et Bab Bou Idir la très faible valeur du coefficient de détermination ne peut trouver son explication que dans un problème de mesure, notamment si l'on compare le score de la station de Fès avec celle de Fès ABH, supérieur à 0,9.

Deux stations se démarquent vraisemblablement du fait de leur emplacement. La station de Missour est située à 890 m d'altitude dans la haute vallée de la Moulouya abrité des flux d'ouest par les reliefs du Moyen-Atlas. Ses caractéristiques climatiques sont comparables à celles des régions sahariennes et sub-sahariennes. La station de Meknès de position plus occidentale semble être moins abritée des flux de NO par les collines du Pré-Rif.

On peut également noter une dégradation du coefficient de corrélation des stations situées au cœur du Moyen-Atlas ce qui témoigne bien de l'influence des reliefs sur les précipitations.

A ce stade on dispose d'un échantillon homogène dont l'extension géographique dans lequel s'inscrit plus ou moins le bassin versant du haut Sebou (fig.3.10).

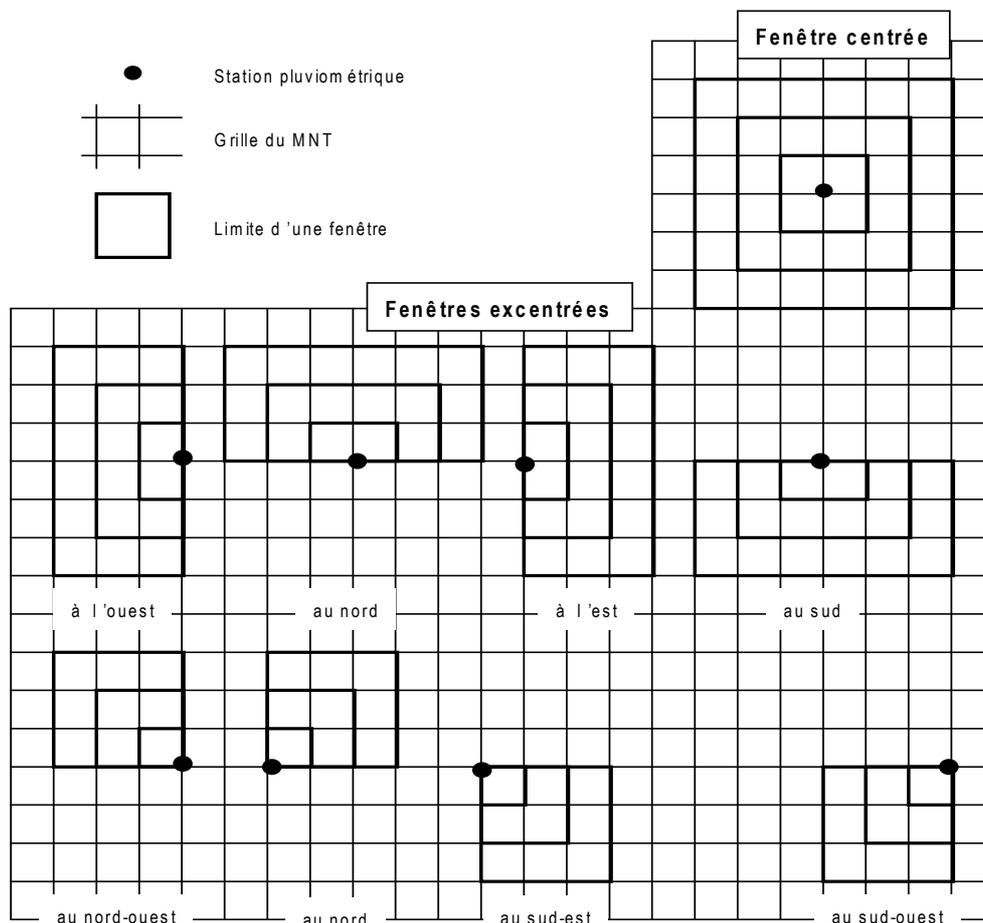
Figure 3.10 : Résultat de la méthode du Vecteur Régional



3-2- Définition et extraction des variables prédictives

La deuxième étape vise à définir et dériver les prédicteurs principaux et secondaires. Les prédicteurs principaux sont dérivés du MNT SRTM. Il consiste en un calcul d'altitudes absolue, moyenne ou relative sur des fenêtres centrées ou excentrées d'extension comprise entre 1 et 32 km autour du site des stations pluviométriques (fig.3.11). La variable secondaire est l'indice normalisé de végétation NDVI correspondant au site de la station. Il renvoie en quelque sorte à la densité de végétation qui est dépendante de la pluviométrie. Pour ces deux types de variables la résolution spatiale retenue est le kilomètre.

Figure 3.11 : Fenêtres utilisées pour le calcul des paramètres par station



François D., Humbert J., 1999.

3-3- Définition du modèle

La troisième est la définition proprement dite du modèle de spatialisation. Cette étape vise à formuler mathématiquement le lien entre quantité précipité aux stations et variables

prédictives. Différentes méthodes de la géostatistique ont été testées mais leurs résultats n'ont pas été probants au regard du temps passé pour ajuster les différents variogrammes. Ces méthodes ont donc été délaissées au profit de régressions. Ce sont des techniques qui visent à prédire les valeurs prises par un groupe de variables Y (variables à prédire, variables cibles, variables expliquées) à partir d'une série de variables X (variables prédictives, les descripteurs, variables explicatives). Dans ce cas la valeur de la pluie est calculée par une équation du type :

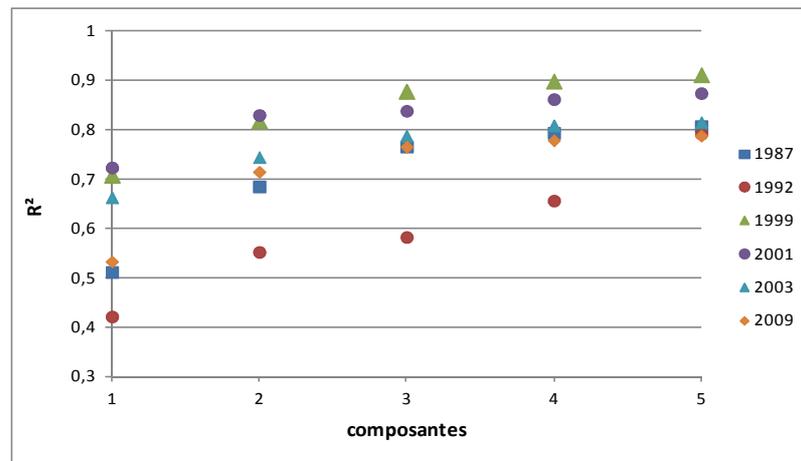
$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n + \varepsilon$$

Tout l'enjeu de cette technique est d'optimiser la relation entre variables à prédire et prédicteurs. A cet égard, la bibliographie sur ce sujet a montré que la "régression linéaire multiple" était utilisée jusqu'à présent dans le cadre d'une spatialisation des précipitations (François, 1998 ; Lebaut, 2000 ; Drogue, 2002). Cependant, un des plus gros écueils de ce type de régression est la colinéarité lorsque les variables exogènes sont excessivement corrélées comme c'est le cas pour la centaine de prédicteurs topographiques dont nous disposons. Dans ce cas les coefficients deviennent incohérents, en contradiction avec les connaissances du domaine. Des variables, a priori très importantes, paraissent non significatives et sont par conséquent éliminées à tort.

Afin d'éviter cet écueil, la technique de la régression PLS (Partial least Square) a été retenue (Tenenhaus, 1998). Elle permet de réaliser une régression multiple quand les techniques usuelles sont inefficaces : variables explicatives corrélées, hypothèse de normalité non remplie, nombre d'observations faible par rapport au nombre de variables explicatives, etc... (Vennetier, 2005).

Cette méthode a été mise en œuvre dans le logiciel "Tanagra" avec les jeux de données des 19 postes constituant la région pluviométrique homogène et les 126 prédicteurs.

Afin d'optimiser le modèle nous avons choisi de travailler avec 5 composantes même si à partir de la 4^{ème} le gain est faible (fig.3.12). En moyenne pour les précipitations annuelles les 3 premières composantes expliquent 77.5 % de la variance des précipitations et les 2 dernières 3 %.

Figure 3.12 : Exemples de coefficient de corrélation R^2 en fonction du nombre de composantes

Même si la technique de la régression PLS permet de traiter plus de variables explicatives que d'observation nous avons fait le choix de n'utiliser que 8 variables explicatives pour construire la variable précipitation ; Ceci afin de garder une dimension "interprétable" du modèle. A cette fin nous avons utilisé l'option VIP (Variable Importance in Projection) du logiciel "Tanagra" qui classe de façon décroissante la pertinence des variables explicatives (fig.3. 13).

Figure 3.13 : Exemple pour l'année hydrologique 1982/1983

VIP (Variable Importance in Projection)					
Input	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
NDVI	2,3376	2,4262	2,5338	2,4308	2,3915
NE16Std	1,3944	1,8412	1,9386	1,8655	1,8551
ReINE16Max	2,2704	2,1986	1,9357	1,7611	1,7294
ReINE32Max	2,1183	1,9357	1,655	1,6108	1,5823
ReINW32M	2,0887	1,8877	1,6856	1,5779	1,56
ReISW4Max	0,2868	0,744	1,6219	1,5089	1,4845
SW16Std	1,0207	1,0948	1,6481	1,5073	1,4774
ReINE8M	1,3293	1,2028	1,2671	1,5033	1,4756

Pour les précipitations annuelles la variables NDVI est celle qui explique le plus la variabilité des précipitations.

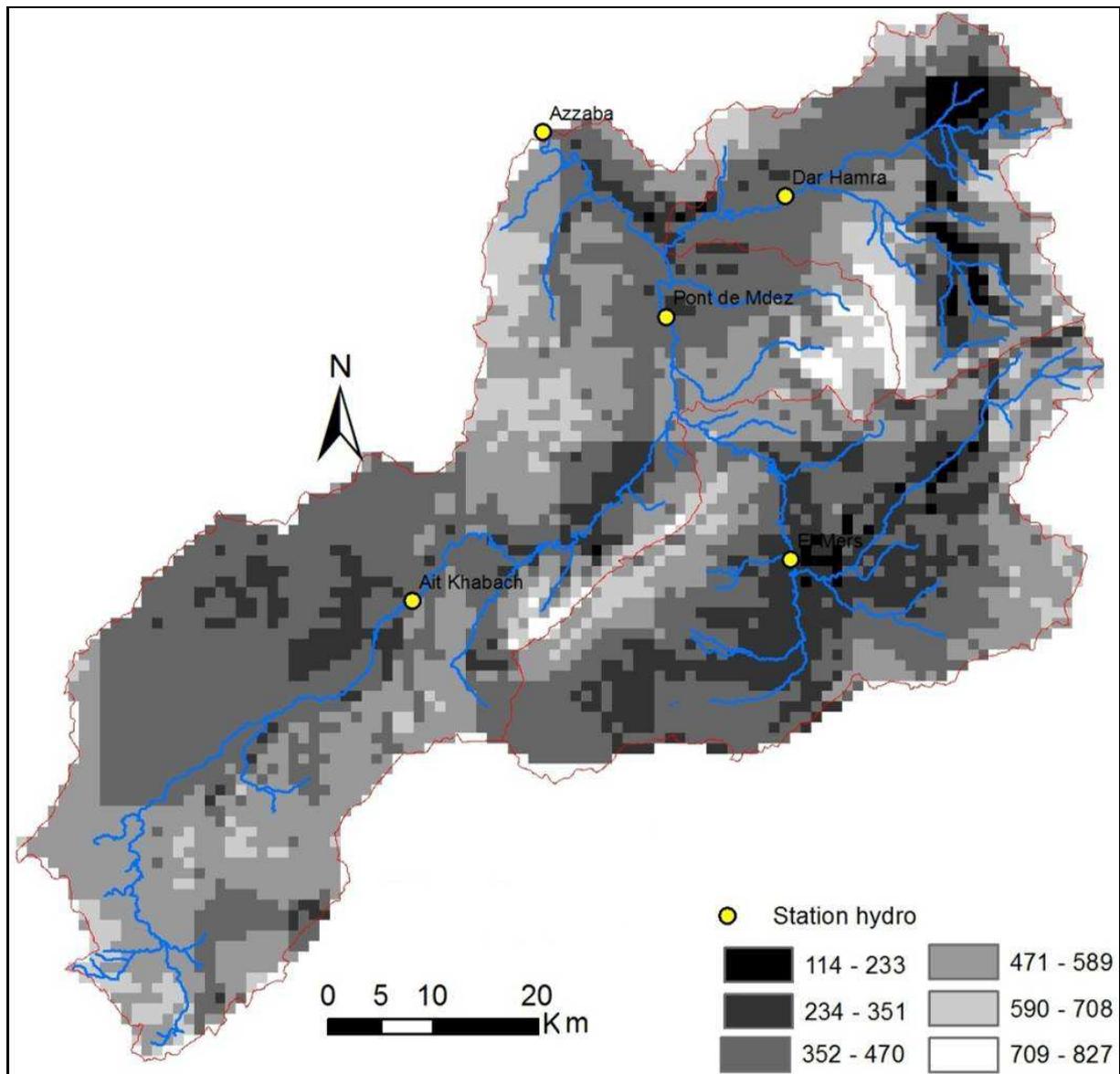
3-4- Résultats en interannuels : chronique 1974/2010

En moyenne interannuelle sur la chronique 1974/2010 le modèle exprime 87.5 % de la variance des précipitations aux 19 postes. Ces résultats très corrects ne peuvent néanmoins

être validés dans la mesure où nous avons fait le choix de maximiser les performances du modèle en utilisant l'ensemble des postes donnés par le vecteur régional.

Les résultats donnent une moyenne des précipitations annuelles sur la période 1974-2010 sur le bassin versant à Azzaba de 456 mm. L'organisation spatiale des précipitations montre deux pôles pluviométriques au niveau de massif du jbel Tichoukt (750 mm) et de celui du jbel Bou Iblane (800 mm). Les minima pluviométriques sont localisés dans la plaine de la Serghina (valeurs les plus faibles de l'ordre de 230 mm), à l'amont du bassin versant du Zloul (200 mm), dans la cuvette de Skoura (300 mm) et la basse vallée du Sebou à l'amont d'Azzaba (330 mm).

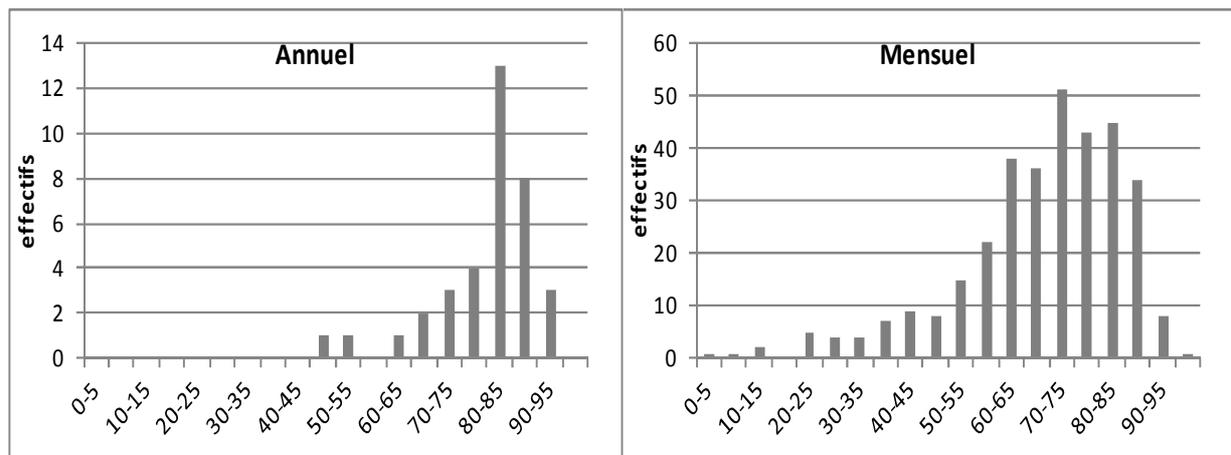
Figure 3.14 : Les précipitations moyennes annuelles 1974-2010 (mm) par le modèle PLS



3-5- Les résultats du modèle à l'échelle annuelle et mensuelle

Sur les 36 années particulières modélisées, en moyenne le modèle exprime 80.5 % de la variance des précipitations. Les résultats sont néanmoins dispersés (fig.3.15), compris entre 48% pour l'année 2006/07 et 91% pour 1990/91. Au final c'est 1/3 des années qui ont une variance expliquée inférieure à 80 %.

Figure 3.15 : Distribution du pourcentage de variance expliquée par le modèle PLS à l'échelle annuelle et mensuelle



A l'échelle mensuelle, durant les mois d'été les pluies d'origine orageuse ne peuvent être expliquées par les variables topographiques. Pour les 9 autres mois de l'année, seul 26 % ont une variance des précipitations expliquée à au moins 80 %. Ces trop faibles résultats nous ont contraints à utiliser une autre méthode.

3-6- La méthode de "l'inverse des distances"

Nous basans sur la thèse de Nejari (2002) nous avons fait le choix de mettre en œuvre la méthode de spatialisation de "l'inverse des distances" qui a donné des résultats corrects. Cette méthode a le mérite de respecter les précipitations aux postes et d'extrapoler des valeurs dans les limites des valeurs observées. Ceci en constitue également une limite lorsqu'il y a, comme dans le bassin versant du haut Sebou des reliefs sur lesquels aucune donnée n'est enregistrée. Néanmoins la méthode de "l'inverse des distances" est une méthode appropriée pour conceptualiser les relations spatiales entre des variables continues dans l'espace telles que les données de précipitations.

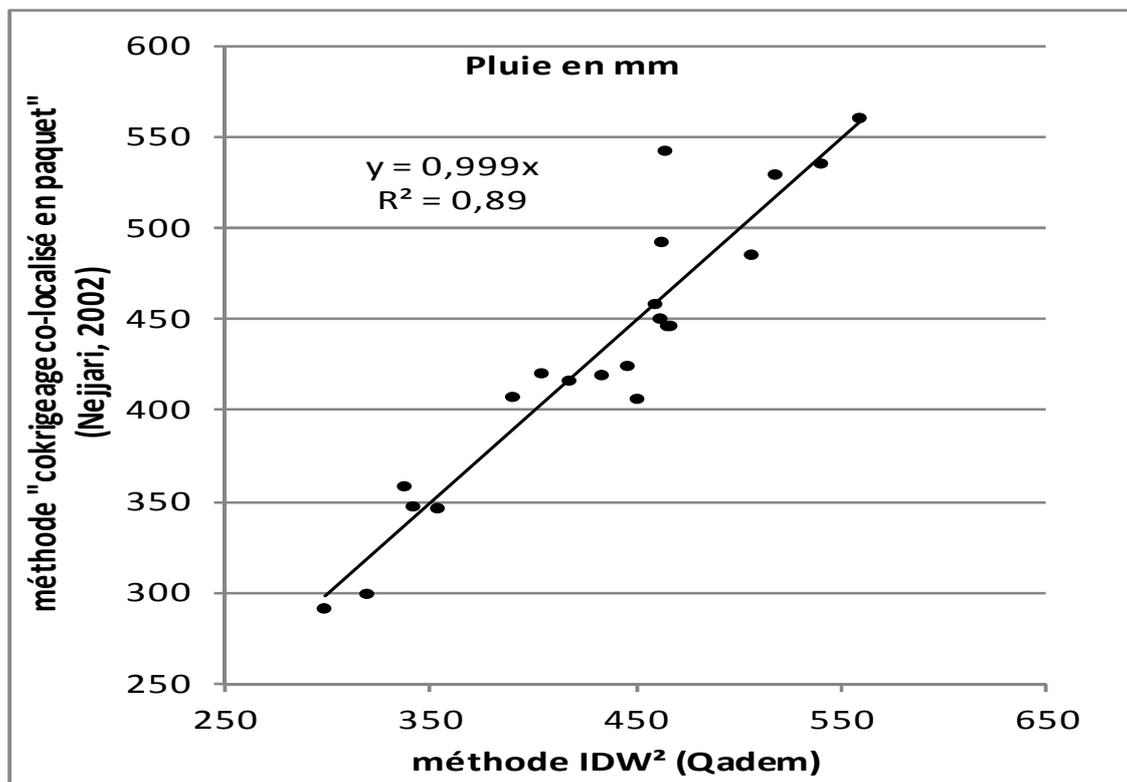
La méthode a été mise en œuvre dans le logiciel ArcGis avec toutes les stations pluviométriques disponibles sur la chronique soit 22. Nous avons fait le choix d'attribuer à

chaque station pluviométrique S_i un poids inversement proportionnel à la distance au carré entre le site et le point à estimer S_0 . Dans ce cas on obtient comme estimateur :

$$\hat{Z}(S_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} \frac{Z(S_i)}{|S_i - S_0|^2}}{\sum_{i=1}^{n_p} \frac{1}{|S_i - S_0|^2}}$$

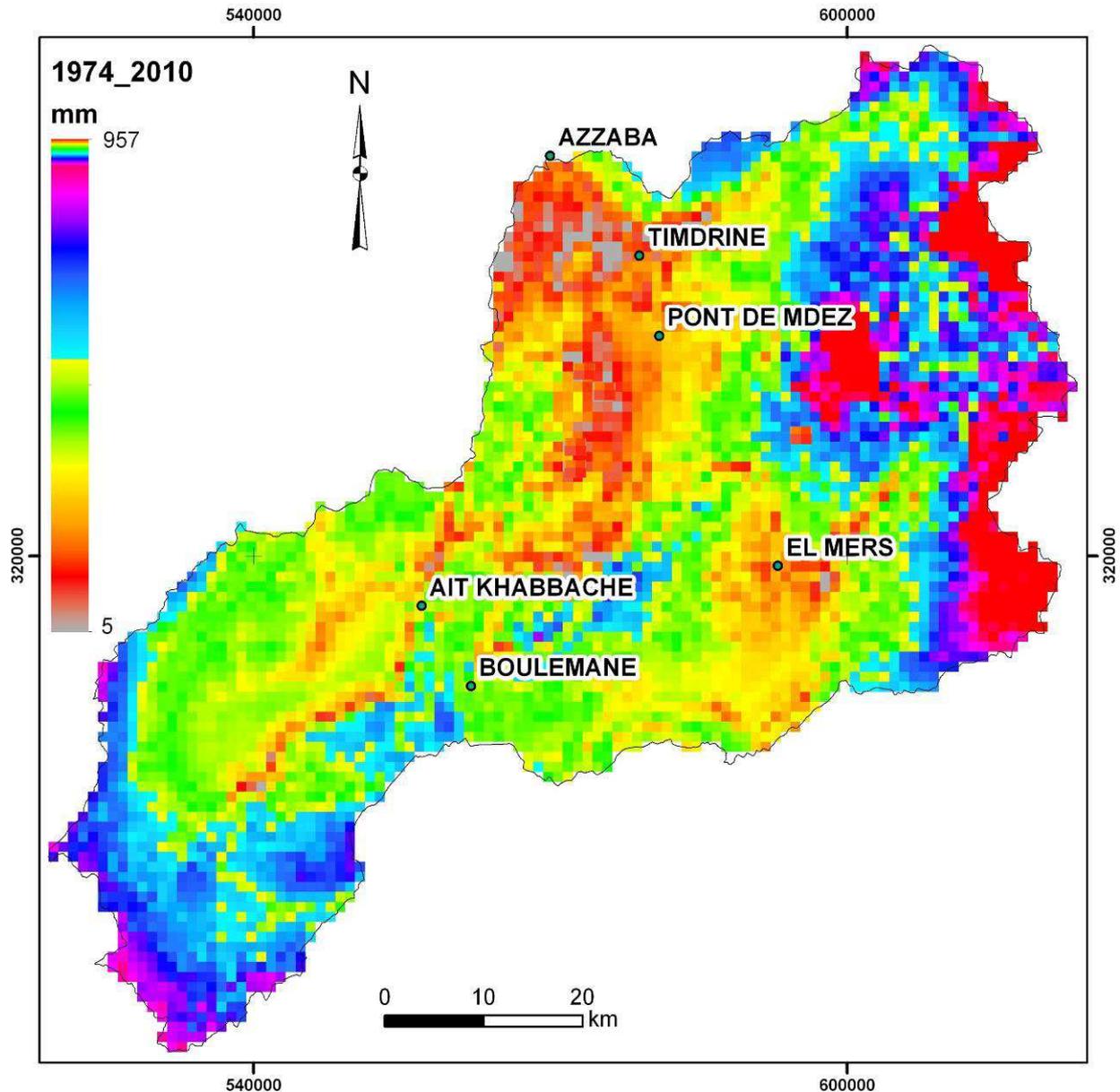
L'inconvénient majeur de cette méthode est de définir la valeur de pluie recherchée en un point uniquement sur la base de la distance qui sépare les sites entre eux. La non prise en compte du facteur relief, ni de la structure spatiale des données, comme le font les méthodes de la géostatistique ou modélisatrice, abouti à une quantification spatiale des précipitations peu précise. Notons néanmoins que Nejjari (2002) par comparaison de 11 méthodes de spatialisation des pluies annuelles sur le Haut Sebou abouti en validation à une erreur de 17 % avec la méthode de l'inverse distance et 12.5 % par la méthode géostatistique du cokrigage co-localisé en paquet", ce qui se traduit sur la période commune 1974 – 1995 par un R^2 de 0,89 (fig.3.16).

Figure 3.16 : Relation entre les pluies calculées par la méthode "inverse des distances au carré" et celle du "cokrigage co-localisé en paquet"



Au final les valeurs de précipitations sur les 5 bassins du Haut Sebou aux échelles annuelles et mensuelles sont donc déterminées par la méthode "inverse des distances au carré".

Figure 3.17 : Carte des précipitations moyennes annuelles sur la période 1974-2010



La moyenne des précipitations annuelles sur la période 1974-2010 sur le Haut Sebou est de 450 mm. Il montre l'hétérogénéité de l'organisation spatiale des pluies. Les faibles moyennes sont enregistrées dans la cuvette de Mdez-Sebou. Le massif du jbel Tichoukt et de celui du jbel Bou Iblane enregistre les valeurs les plus fortes (plus de 900 mm).

III- L'évapotranspiration potentielle et réelle

L'évapotranspiration (ETR) est un terme global qui regroupe tous les processus qui transforment l'eau liquide ou solide, à la surface du sol ou à proximité, en vapeur d'eau. Ce terme regroupe l'évaporation (du sol, surface d'eau libre...) et la transpiration des végétaux.

L'évapotranspiration constitue, avec les précipitations, une des composantes les plus importantes du cycle de l'eau mais également une des plus variable spatialement. En effet l'évapotranspiration est un processus complexe qui dépend du climat (l'énergie solaire et l'état de l'atmosphère jouent un rôle déterminant) mais aussi d'un ensemble de facteurs relatifs au système sol-plante : extension de la surface évaporante, albédo, caractéristiques du couvert végétal (sa rugosité par exemple)... Une équation qui décrit le mieux ce mécanisme de prélèvement est celle de Penman-Monteith (in Shaw, 1994) :

$$E_{tr} = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (e_a - e_d) / r_a}{\lambda (\Delta + \gamma (r_s + r_a) / r_a)} \text{ g.m}^{-2} . \text{s}^{-1}$$

avec :

R_n	radiation nette	λ	rapport des coefficients de Dalton
ρ	masse spécifique de l'air	γ	constante psychrométrique
C_p	chaleur spécifique de l'air	e_a	pression de vapeur d'eau saturante à la température de l'air sous abris
r_s	à pression constante résistance nette à la diffusion à partir de la surface des feuilles	e_d	pression de vapeur d'eau mesurée sous abris
r_a	résistance nette à la diffusion à partir du sol	Δ	la pente de la courbe de la pression de vapeur d'eau saturante en fonction de la température

Compte tenu de la difficulté à estimer ou mesurer ces variables, cette formule est peu applicable, comme dans notre cas. Donc plus généralement le calcul de l'ETR repose sur une conceptualisation du bilan hydrique (interaction atmosphère avec le complexe sol/plante) dont la base est l'ETP (évapotranspiration potentielle), concept élaboré par Thornthwaite en 1948. L'évapotranspiration potentielle représente « la consommation en eau maximale, dans des conditions hydriques non limitatives, d'un couvert végétal assez étendu » (Henia, 1993). Elle est donc la somme de la transpiration du couvert végétal (à travers les stomates des plantes) et

de l'évaporation des sols. Les approches basées sur la physique du phénomène, certes plus simples que l'ETR, demandent toujours des paramètres difficilement quantifiables. C'est la raison pour laquelle de nombreux chercheurs ont établi une formulation empirique de l'ETP en termes de corrélations statistiques entre des variables complexes à mesurer et des variables couramment mesurées, comme la température par exemple. Selon Hingray et al., (2009), l'estimation de l'ETP peut être classée suivant les données qu'elles utilisent, ce sont :

- Les méthodes empiriques basées sur la température (formulation de Thornthwaite ou de Balancy et Criddle). Pour calculer l'ETP ces méthodes s'appuient sur la température, l'humidité relative de l'air et la durée d'ensoleillement.

- Les méthodes empiriques basées sur le rayonnement (méthode de Turc ou de Taylor). Elles se basent sur les données du rayonnement, de la température de l'air, de l'humidité relative et éventuellement de la vitesse du vent.

Compte tenu des données dont nous disposons nous avons fait le choix du calcul de l'ETP à partir de la formulation de Turc (1961):

$$ETP = K \cdot \left(\frac{T}{T+15} \right) (I_g + 50) \left(1 + \frac{0.5 - HR}{0.7} \right) \quad \text{avec} \quad I_g = I_{ga} \cdot \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

Les variables sont :

ETP : évapotranspiration mensuelle en mm

T : température moyenne du mois en °C

I_g : radiation solaire au sol (cal/cm²/mois)

I_{ga} : radiation solaire en limite d'atmosphère (cal/cm²/mois)

h : durée d'ensoleillement mesurée au sol (h)

H : durée astronomique du jour (h)

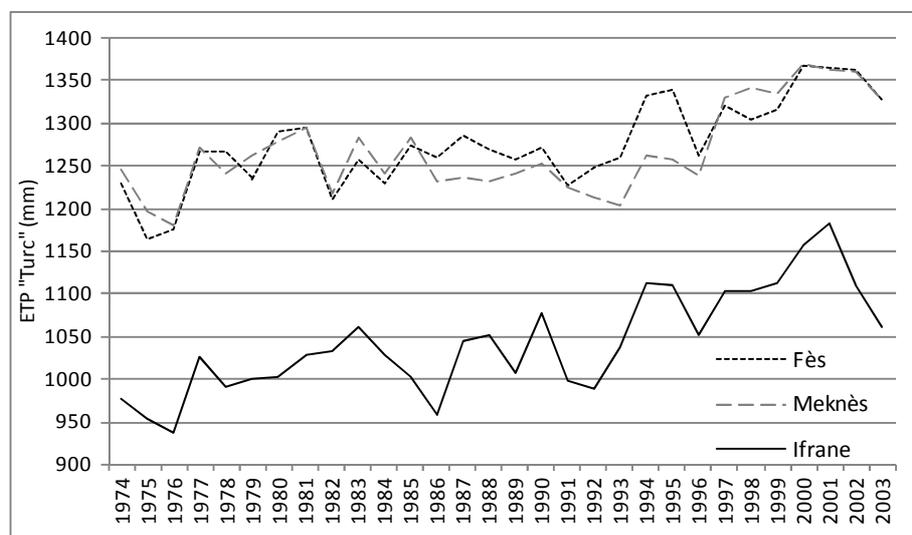
HR : humidité relative (%)

K : facteur dépendant du nombre de jour dans le mois (ad.)

Le calcul de l'ETP Turc a été fait sur la chronique 1974 – 2003 aux stations de Fès, Meknès, et Ifrane (fig.3.18) pour lesquelles nous disposons des données de température, d'insolation et d'humidité relative. Nous disposons également des données de Taza mais trop lacunaire dans les années 1974-1979.

Tableau 3.6 : Les stations thermométriques utilisées

Stations	Altitudes (m)	X (m)	Y (m)	Période d'étude
Fès	569	540422	373066	1961-2003
Meknès	550	487500	365000	1961-2003
Ifrane	1640	524700	323200	1958-2003

Figure 3.18 : Variations annuelles de l'ETP "Turc" pour la période (1974-2003)

Les valeurs enregistrées aux postes de Fès et de Meknès situés à peu près à la même altitude et éloignés d'une quarantaine de kilomètres ont des valeurs d'ETP comparables de l'ordre de 1270 mm. La station d'Ifrane plus élevée de 1648 m a une ETP de 1040 mm. La variabilité de l'ETP est faible, de 6% pour cette dernière elle est de 4% pour les deux autres stations. Notons également que sur les 30 ans il y a une dérive positive de l'ETP de l'ordre de 4 mm pour les stations de Fès et Meknès et de 5 mm pour celle d'Ifrane ce qui aboutit à une augmentation de 150 mm d'ETP environ aux stations sur cette période.

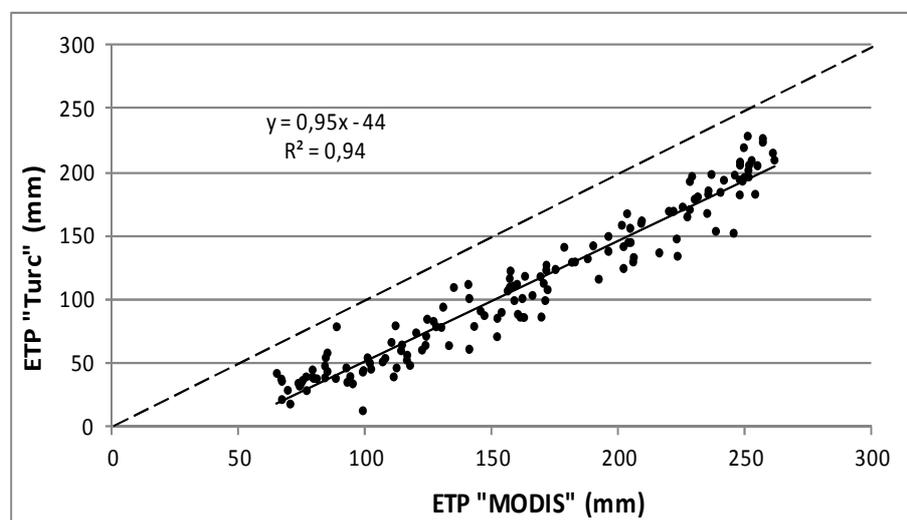
En l'absence de données de températures, d'insolation et d'humidité relative acquises après 2003 nous avons fait le choix pour compléter les données d'ETP jusqu'à 2010 d'utiliser des données issues de mesures satellitales.

1- L'ETP et l'ETR dérivées de l'imagerie satellitale

Depuis une dizaine d'années les capteurs embarqués à bord des satellites enregistrent des informations qui permettent de dériver en les combinant à des données au sol les variables

ETP et ETR. L'algorithme développé par Mu et al., (2007, 2011) permet le calcul de valeurs de l'évapotranspiration potentielle et réelle à l'échelle globale. Cet algorithme basé sur l'équation de Penman-Monteith (1965) utilise des données issues du satellite MODIS suivantes : type d'occupation du sol, albédo, l'indice foliaire et la radiation en courte longueur d'onde. Les autres variables, correspondant au forçage météorologique sont des données météorologiques quotidiennes issues de ré-analyses fournies par la NASA (MERRA GMAO). Les données MODIS "MOD 16" mensuelles ont été téléchargées à partir du site de l'USGS et organisées dans le logiciel ArcGis. Elles ont ensuite été comparées aux valeurs d'ETP Turc pour les 3 stations de Fès, Meknès et Ifrane (fig.3.19).

Figure 3.19 : ETP Modis/ETP Turc pour les 3 stations de 2000 à 2003



Signalons que les valeurs d'ETP Turc sont des valeurs aux stations tandis que celles de l'ETP Modis sont des valeurs calculées pour une surface élémentaire de 1 km². Globalement les deux types de valeurs sont cohérentes puisque le biais n'est que de 5 % entre les deux séries de données. Par contre l'ETP Modis surestime l'ETP Turc de l'ordre de 30% pour les 3 sites (tab.3.7).

Tableau 3.7 : Valeurs d'ETP et d'ETR pour les 3 stations

	en mm	2000	2001	2002	2003	moyenne	écart ETP Turc-ETP MODIS
Fès	ETP Turc	1364	1368	1339	1327	1350	29%
	ETP MODIS	2021	1957	1970	1880	1957	
Ifrane	ETP Turc	1345	1344	1245	1260	1299	33%
	ETP MODIS	2026	2014	1989	1882	1978	
Meknes	ETP Turc	1531	1408	1366	1237	1385	34%
	ETP MODIS	2016	1975	1955	1878	1956	

Pour faire notre choix entre ces deux types de données nous pouvons faire référence aux travaux de Loup (1957) qui a proposé des valeurs d'évaporation à partir de mesures faites en bac Colorado à proximité de 6 lacs naturels ou artificiels pouvant être mis en relation avec nos trois stations de mesures. Les valeurs reprises dans le tableau 3.8 sont les valeurs enregistrées aux bacs pondérées d'un coefficient de 0,78. Cette minoration est préconisée par Loup pour passer de valeurs enregistrées en bac à de grandes surfaces.

Tableau 3.8 : Évaporation annuelle au niveau de 6 lacs (Loup, 1957)

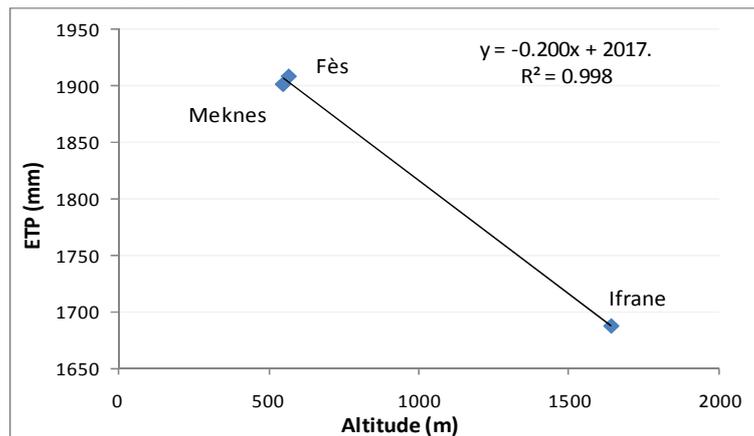
Régions géographiques	Bassin	station	Altitudes	Evaporation mm/an
Plaine littorale atlantique	O. Mellah	Barrage	80 m	1775
plaines sublittorales atlantiques	O. Zemrane	Barrage O.C.P.	715 m	1762
	Oumer Rbia	Barrage d'Im Fout	200 m	1850
Atlas: Vallées du versant atlantique	O. El Abid	Barrage Bin el Ouidane	820 m	1650
	O. Tesaout	Timi n'Outine	800 m	1990
	NFis	Barrage Cavagnac	654 m	1583

Il en ressort que les valeurs calculées selon Turc sont inférieures de plus de 400 mm/an par rapport à celle proposées par Loup, issues de mesures in-situ. Si l'on admet que l'ETP doit être plus élevé que l'évaporation seule alors les valeurs Modis apparaissent les plus appropriées pour caractériser l'ETP dans le bassin du Haut du Sebou. Ce sont ces dernières que nous retenons donc comme valides.

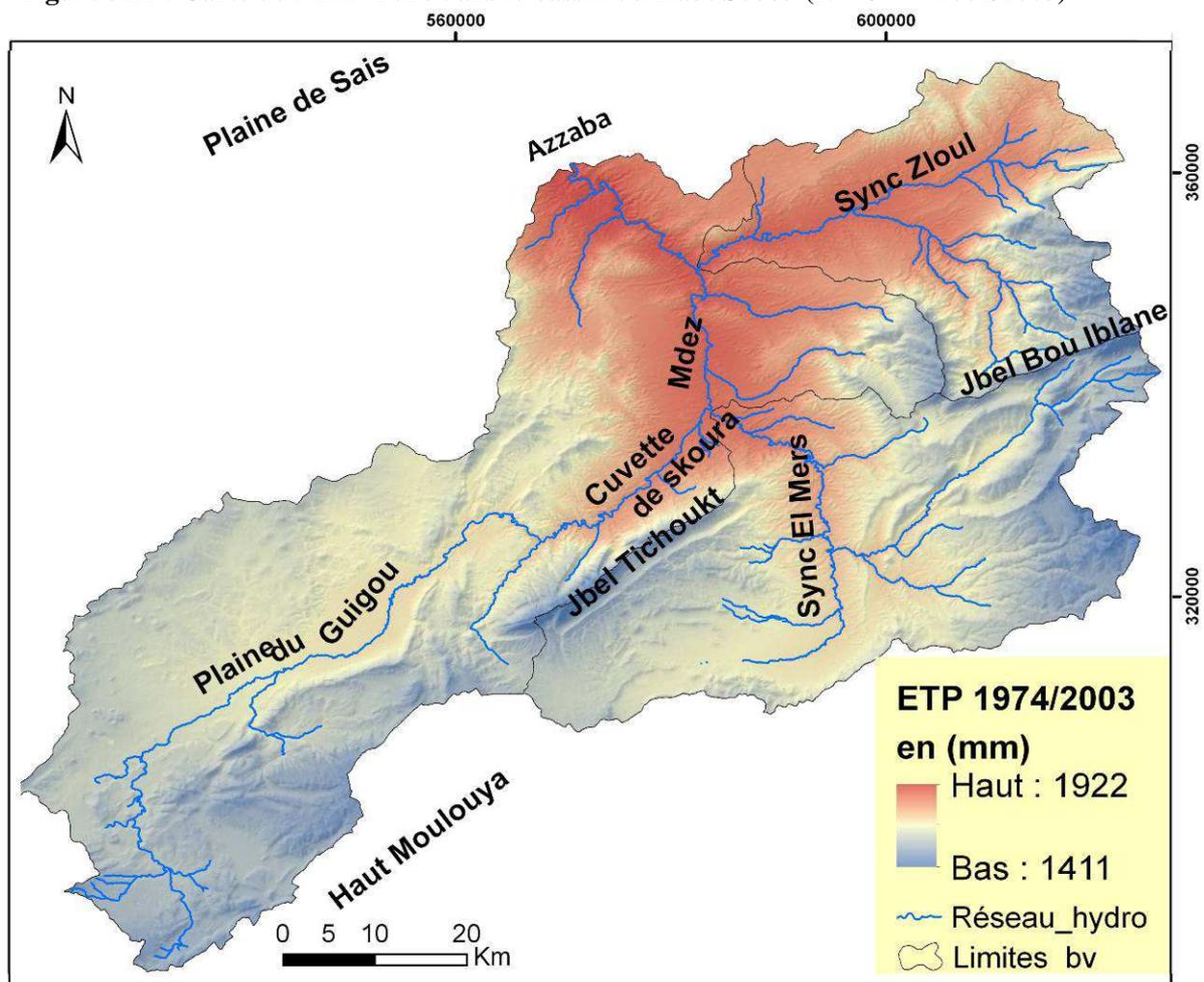
Afin d'homogénéiser la série de valeurs d'ETP sur toute la période d'étude l'ensemble de la période 1974/75 – 2009/2010 nous avons corrigé les valeurs d'ETP Turc sur la base de l'équation de la régression linéaire obtenue plus haut (fig.3.19 : ETP Modis/ETP Turc pour les 3 stations de 2000 à 2003).

2- La spatialisation de l'ETP

La spatialisation de l'ETP repose sur la bonne relation établie entre l'ETP et l'altitude des 3 postes climatologiques ($R^2 = 0.94$). L'équation du gradient (fig.3.20) a été appliquée au modèle numérique de terrain pour avoir une valeur d'ETP tous les 1 km² sur le bassin à l'échelle mensuelle sur la période 1974/75 – 2002/2003. A partir de 2003 les valeurs d'ETP sont celles de Modis.

Figure 3.20 : Relation ETP/altitude

Bien évidemment cette relation établie avec trois points dont deux très proches est simpliste mais nous ne disposons de données que pour ces trois stations; Soulignons d'autre part que pour les mois d'hiver elle ne rend pas compte des inversions thermiques possibles dans les cuvettes.

Figure 3.21 : Carte de l'ETP Turc dans le bassin du Haut Sebou (1974/75 – 2002/2003)

La cartographie de l'ETP Turc sur la période 1974-2010 donne une moyenne annuelle de 1666 mm. Les cuvettes et les fonds des vallées enregistrent les valeurs les plus fortes de l'ordre de 1900 mm). Les valeurs les plus faibles sont localisées dans les massifs montagneux de jbel Tichoukt et de jbel Bou Iblane (1411 mm).

3- L'ETR

Les valeurs de l'ETR Modis, disponibles à l'échelle mensuelle ont également été téléchargées à partir du site de l'USGS. Ces valeurs calculées à l'échelle globale ont fait l'objet d'évaluation sur des sites particuliers représentatifs de différents biomes. Ces évaluations reposent sur des corrélations entre les valeurs d'ETR Modis du pixel de 1 km² avec les valeurs déterminées au sol à partir de tours de mesure de flux. Les résultats de ces validations sont mitigés. Par exemple, pour un écosystème de savane les coefficients de corrélations R² entre les deux jeux de données s'échelonnent sur la période 2000-2009 de 0,23 à 0,85 (Ramoelo et al., 2014) avec un biais pouvant être important. Néanmoins ces écarts de valeurs ne sont pas tous liés à la procédure Modis, il peut y avoir également des incertitudes liées aux mesures à partir des tours de mesures de flux et bien évidemment l'écart de surface entre la valeur ponctuelle au sol et celle exprimée au km² par Modis compte également pour une part non négligeable dans l'erreur entre les deux types de valeurs. Conscient de l'incertitude attachée à ces valeurs, il nous semble néanmoins intéressant d'utiliser celles-ci sur le bassin du Haut Sebou dans le cadre de cette étude hydrologique.

Sur la totalité du bassin du Haut Sebou le montant de l'ETR est en moyenne de 225 mm sur la période 2000/2010. Si le coefficient de variation est faible 10,8 % l'écart entre l'année 2000 et 2010 est de presque 100 mm soit près de 50% en plus (tab.3.9).

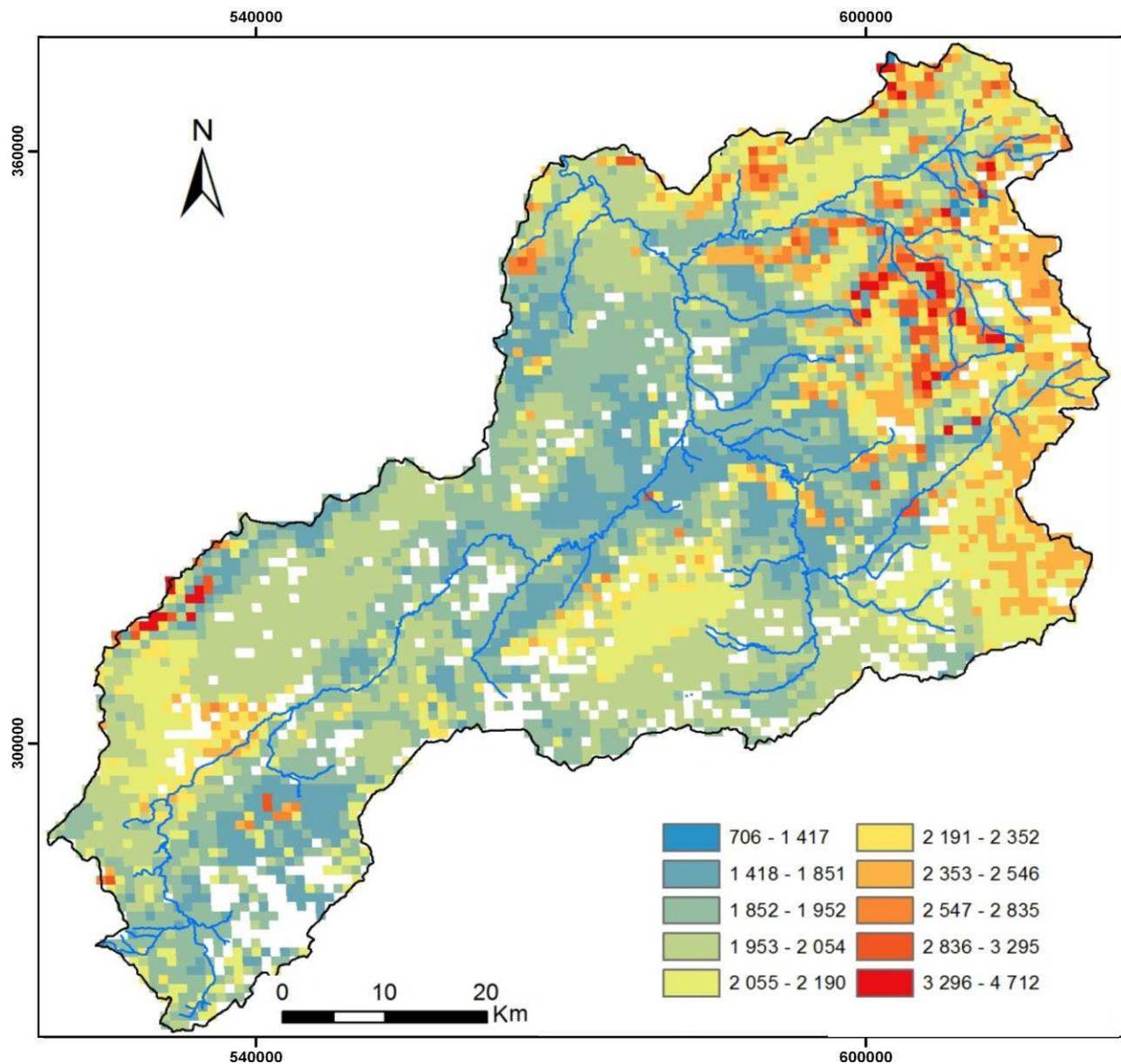
Tableau 3.9 : Valeurs de l'ETR Modis annuelle (mm) pour les bassins versants du Haut Sebou

station	BV	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Moyenne	Ecart type	coef. var.
Azzaba	Haut Sebou	191	218	209	228	229	203	237	211	220	247	280	225	24	10,8%
Dar El Hamra	Zloul	200	228	216	242	233	210	238	218	223	252	289	232	24	10,4%
El Mers	Maasser	178	208	196	206	211	189	222	201	213	226	257	210	21	10,0%
Pont Mdez	Haut Sebou	180	207	199	212	216	190	228	199	212	232	264	213	23	10,8%
Ait Khabach	Guigou	174	195	194	209	210	185	225	189	197	230	260	206	24	11,9%

Les contrastes spatiaux sont accusés avec des montants dépassant les 400 mm dans les forêts de chênes verts (les versants ensoleillés en hautes altitudes du Guigou amont) à moins de 100 mm dans les massifs rocheux (fig.3.22). A l'échelle des sous bassins du haut Sebou la

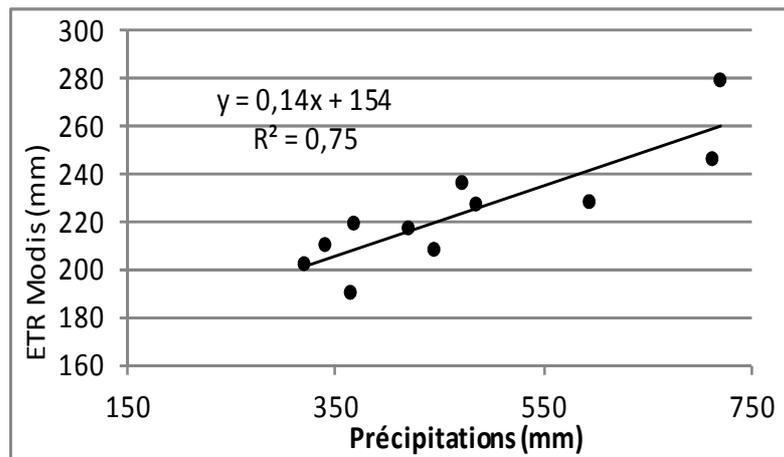
différence est de l'ordre de 10 % : 232 mm pour le bassin du Zloul et 206 mm pour celui du Guigou à l'amont d'Aït Khabach (fig.3.22).

Figure 3.22 : ETR Modis (1/10 mm) du bassin du Haut Sebou

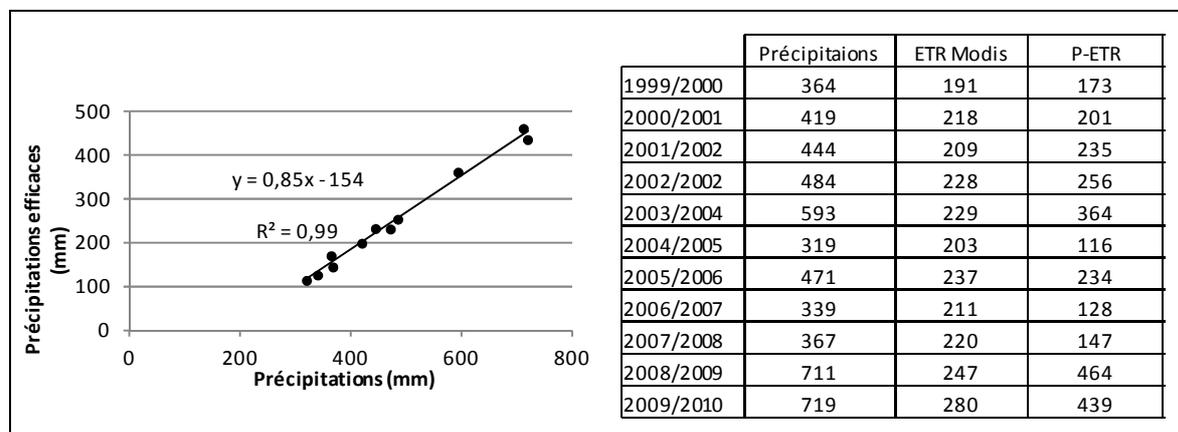


4- Estimation de la pluie efficace sur le bassin versant

Comme « fraction des précipitations génératrice d'écoulement, immédiat ou différé, superficiel ou souterrain (Glossaire International d'Hydrologie, 1992) » les précipitations efficaces sur le bassin du Haut Sebou peuvent être calculées, sur la période 2000-2010, comme différence de la pluie et de l'ETR Modis spatialisée sur les bassins versants. Soulignons que la bonne relation entre le montant des précipitations et celui de l'évapotranspiration réelle va dans le sens d'une cohérence des données Modis (fig.3.23).

Figure 3.23 : Relation précipitations / ETR Modis annuelles

Du point de vue de la ressource en eau le montant des précipitations efficaces constitue une première évaluation des capacités fournies par le bassin. Sur les 11 années disponibles la ressource moyenne correspond à 251 mm pour le bassin versant du Haut Sebou à Sebou. Mais si l'on exclue les deux années de 2008 à 2010 de pluviométrie exceptionnelle la ressource moyenne n'est plus que de 206 mm (fig.3.24). Cette dernière valeur correspond à un volume de 956 hm³.

Figure 3.24 : Relation précipitations / précipitations efficaces sur le bassin du Haut Sebou à Azzaba.

La relation établie entre précipitations et précipitations efficaces peut avoir une valeur prévisionnelle en termes de gestion de la ressource, en gardant toutefois à l'esprit qu'elle reste à valider dans le cadre d'un bilan hydrologique.

Conclusion du chapitre 3

Le bassin du Haut Sebou appartient à un domaine climatique semi-aride, dont les pluies moyennes annuelles sont globalement comprises entre 300 et 700 mm sur la période considérée. D'autre part, les résultats du modèle de quantification spatiale des précipitations annuelles moyennes montrent de forts contrastes au sein du bassin; Ils sont liés aux orientations des reliefs et à la succession de larges cuvettes et de crêtes. Cependant la trop faible valeur de la variance expliquée par le modèle pour certaines années et de nombreux mois nous a contraints à choisir une méthode d'interpolation pour le calcul des pluies mensuelles utilisées dans la modélisation du bilan hydrologique. Pour l'évapotranspiration les valeurs calculées par la formule de Turc sont très inférieures aux valeurs dérivées des mesures satellitales. Ces dernières sont plus proches des valeurs d'évaporation mesurées au sol et constituent donc notre référence. Elles restent à valider dans le cadre de bilans hydrologiques. L'utilisation des valeurs d'ETR Modis permet une première quantification des précipitations efficaces qui voisine les 1000 hm³ en moyenne annuelle sur la décennie 2000-2010.

Conclusion de la première partie

Après l'identification de la problématique et la méthodologie de leur traitement, l'étude des diverses composantes du bassin versant du Haut Sebou a permis de tirer plusieurs conclusions :

D'abord, le bassin du Haut Sebou représente une grande diversité et hétérogénéité entre les sous bassins versants. Ces contrastes au niveau de l'altitude, de la géologie, et de la lithologie... reflètent automatiquement le fonctionnement de la ressource en eau au niveau des apports, de la circulation, et de l'utilisation de l'eau. En effet, le comportement hydrologique du Haut Sebou est bien influencé par le phénomène karstique dominant le bassin versant. L'hétérogénéité du tracé du réseau hydrographique et de son organisation constitue un témoin de l'hétérogénéité physiographique du Haut Sebou. En outre, la diversité topographique a joué un rôle central dans l'orientation de l'installation humaine et les activités exercées. Nous développerons ces aspects dans la 3ème partie de ce travail.

Par ailleurs l'hétérogénéité qui caractérise les composantes physiques du bassin, s'observe aussi au niveau climatique dont les volumes précipités diffèrent d'une station à l'autre. L'irrégularité spatiotemporelle des apports climatiques explique la modicité et la fragilité des ressources en eau. Rappelons ici que la répartition générale des débits n'est donc pas liée uniquement aux facteurs climatiques. Les circulations karstiques (pertes et émergences) et les prélèvements pour l'irrigation modifient de manière importante l'organisation et la quantité des écoulements. Les résultats de campagnes de jaugeages éclairciront le rôle de ces facteurs dans l'organisation de débit dans le bassin.

Efin, on constate le déséquilibre entre un amont dont les potentialités des ressources en eau sont très limitées avec des activités agricoles qui ne cessent d'augmenter et un aval dont les ressources en eau sont abondantes et bénéficiant des apports d'un système hydro-karstique et dont des activités sont faibles fait de l'absence de terres utiles aux pratiques agricoles.

Partie II

Hydrologie analytique du Haut Sebou

Introduction de la deuxième partie

La compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant repose d'une part sur la connaissance précise de la ressource en eau dans le temps et dans l'espace et d'autre part sur l'analyse des processus hydrologiques liés aux deux types d'écoulement: l'écoulement de base ou non influencé par les précipitations (tarissement) qui correspond au ressuyage des nappes et le ruissellement qui répond plus directement aux précipitations (crues).

Le premier chapitre est une présentation des données hydrologiques disponibles dans le bassin. Il présente les caractéristiques des stations hydrométriques situées dans le bassin versant. Ce réseau de mesures hydrométriques a été implanté de manière à verrouiller cinq bassins relativement étendus, mais l'hétérogénéité des chroniques de débits produits constitue un frein pour la bonne analyse des processus étudiés et pour la comparaison entre les bassins. Par exemple La station d'Aït Khabach ne fonctionne plus à partir de 1981.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons la caractérisation des phases hydrologiques dans le Haut Sebou. Le but est de déterminer le rôle des facteurs géologiques surtout sur les écoulements de surface et souterrain. Si l'écoulement de crue et fonction de la nature du substratum et des conditions météorologiques durant l'épisode, le rythme du ressuyage des aquifères, exprimé par le tarissement, est conditionné par les propriétés intrinsèques (porosité, perméabilité) des roches. La quantification de ces deux phases hydrologiques fournit une base à la modalisation hydrologique.

Le dernier chapitre de cette partie est dédié à l'organisation spatiale des écoulements de basses eaux sur la base de débits mesurés ponctuellement en régime non directement influencé par les précipitations. Ces mesures se font sur des bassins versants de surface réduite que l'on appelle unitaire par opposition aux bassins globaux verrouillés par des stations. La représentation des débits tant surfacique que sur le linéaire du cours d'eau (profil hydrologique), permet de déglobaliser l'information hydrologique en mettant en lumière la disparité spatiale des écoulements de nappe en fonction de la position géographique des aquifères (Lebaut, 2000).

**** Chapitre 4 : Les données hydrologiques**

Sommaire

Introduction

I-Présentation des stations hydrométriques

1- Disponibilité et critiques des données

II-Caractéristiques globales des débits aux stations

1-Modules et débits moyens annuels

1-1-Modules

1-2-CUSUM des débits

2-Etude statistique des débits annuels (1958-59/2009-10)

3-Les régimes hydrologiques

4-Synthèse des écoulements à l'échelle moyenne annuelle

Conclusion

Introduction du chapitre 4

L'étude du contexte morpho-structural et climatique du bassin du Haut Sebou a permis de dégager des différences entre sous bassins et de quantifier les apports en eau ainsi que les caractéristiques de ces impluviums.

Les chroniques de débits des cours d'eau, comme combinaison dans le temps d'écoulements de base et d'écoulements de crue, reflètent le comportement de ces deux paramètres. Elles constituent donc le point d'appui privilégié pour une évaluation de la ressource en eau d'un secteur géographique défini (Lebaut, 2000).

Après avoir présenté le réseau de mesure hydrométrique et les chroniques de données disponibles et leur qualité, ce chapitre s'attache dans un deuxième temps à caractériser l'hydrologie du Haut Sebou à partir des modules puis dans un troisième temps par leur répartition mensuelle. Nous clorons ce chapitre par une synthèse des écoulements annuels moyens.

I- Présentation des stations hydrométriques

Une station hydrométrique se définit comme « une section d'un cours d'eau instrumentée où l'on mesure la hauteur et détermine le débit, à partir d'un ensemble d'équipements notamment une échelle limnimétrique (permettant une observation des hauteurs), un ensemble de capteurs de mesure et éventuellement du matériel de télétransmission des données » (Glossaire d'hydrologie). Selon Hingray et al., (2009), les débits obtenus sur un cours d'eau donné, permettent l'analyse statistique de son régime hydrologique et la caractérisation de certains risques hydrologiques tels que ceux associés aux étiages ou aux crues. Ces données sont par ailleurs aussi primordiales pour la prévision hydrologique en temps réel ou pour le développement d'un modèle hydrologique, en particulier lors de la procédure de calibration de ses paramètres. Les auteurs soulignent aussi que la qualité des données débitométriques influence évidemment la qualité des analyses effectuées et/ou la pertinence du modèle retenu pour reproduire les observations –sans bonnes mesures, pas de bonnes analyses ni de bons résultats des modèles, même s'ils sont performants.

L'étude hydrologique du bassin du Haut Sebou peut s'appuyer sur un réseau de 5 stations hydrométriques (planche photos 4.1) dont les caractéristiques sont répertoriées dans le (tab.4.1) Ce réseau hydrométrique est géré par l'Agence Hydraulique du Bassin du Sebou

(ABHS). Trois stations sont implantées sur le drain principal (Guigou-Mdez-Sebou) et deux sur les affluents les plus importants (Mâassèr et Zloul). Nous disposons également de données sur le complexe sourcier Aïn Sebou, Timedrine et Ouemander mais au pas de temps mensuel.

Planche photos 4.1 : Stations hydrométriques

Station hydrométrique d'Azzaba sur le Sebou (exutoire du Haut Sebou ; 4677 km²)



Station hydrométrique de Dar El Hamra sur le Zloul



Station hydrométrique d'El Mers sur l'oued Maâsser



Tableau 4.1: Les caractéristiques des stations hydrométriques

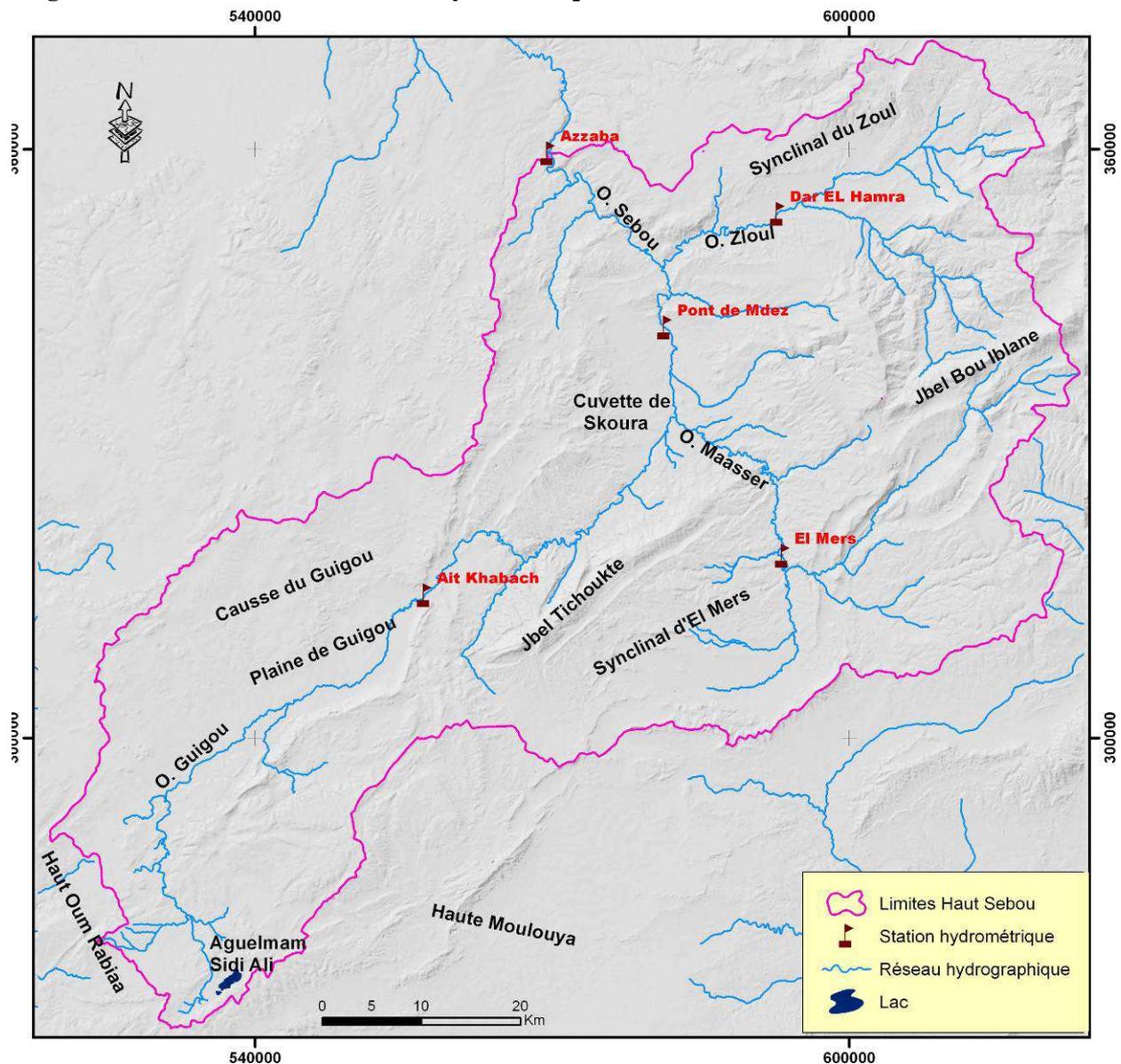
Cours d'eau	Station	Date de mise en service	Surface du bassin contrôlée (Km ²)	Altitude de l'exutoire (m)		
					x	y
Guigou	Aït Khabach	1970	1200	1478	557.00	314.80
Mâassèr	El Mers	1981	985	818	593.00	318.20
Guigou	Pont Mdez	1955	3460	725	581.40	341.90
Zloul	Dar El Hamra	1984	640	830	593.00	318.20
Guigou-Sebou	Azzaba	1957	4677	478	596.65	359.57

-La station d'Aït Khabach sur l'oued Guigou, contrôle l'amont du bassin jusqu'à la fermeture de la plaine du Guigou (le cause, la plaine du Guigou, la dépression d'Ain Nokra et le Moyen Atlas plissé situé à l'amont de Timahdite). Bien que cette station permette de contrôler les écoulements de différentes unités géographiques de l'amont du bassin (le synclinal de Bou Anguar, le plateau de Timahdite, et la plaine de Guigou), elle ne fonctionne plus depuis 1981 date de la rectification du lit de l'Oued Guigou. Notons également que l'écoulement à l'amont de cette station est largement influencé par les prélèvements dans la plaine de Guigou.

-La station d'El Mers mesure les débits du Mâassèr, premier affluent important de l'oued Guigou. Situé en rive droite, il draine les versants sud de Bou Iblane, une partie de Tichoukt, et la dépression de Serghina-El Mers.

-La station de Pont Mdez, situé au centre de la cuvette de Skoura contrôle un bassin versant de 3460 km² issu de la réunion des bassins du Guigou, du Mâassèr et d'Al Atchane).

Figure 4.1 : Localisation des stations hydrométriques



-La station de Dar El Hamra située dans le synclinal de Zloul mesure les débits de l'Oued Zloul (640 km²) et de son principal affluent, l'oued Taffert qui draine les versants nord de Bou Iblane.

-La station d'Azzaba contrôle l'ensemble du bassin du Haut Sebou (4677 km²). Située à l'exutoire du bassin versant entre Timedrine et le barrage Allal El Fassi elle présente la meilleure des courbes de tarage du bassin (Obda, 2004). Il existe une station juste en amont de la station d'Azzaba à Timedrine et Nejari (2002) a montré la très bonne corrélation des débits annuels pour ces deux stations.

1- Disponibilité et critiques des données

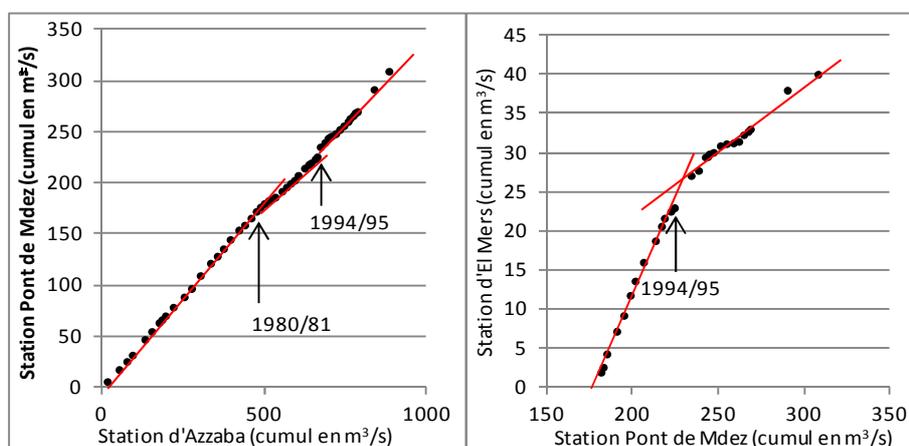
Si la répartition spatiale des stations rend l'étude propice à mettre en évidence les hétérogénéités dans le fonctionnement du bassin, des chroniques de données qui ne se superposent pas (fig.4.1) et certaines données peu précises posent problèmes. En effet, outre des données lacunaires (comblées), la simplification des pratiques hydrométriques à partir de l'année hydrologique 1994/1995 aboutit à des données arrondies au mètre cube près pour l'ensemble des stations. D'ailleurs, la crue d'octobre 2008 a emporté les limnigraphes de la station de Pont Mdez.

Figure 4.2: Chronogramme des débits disponibles

Station	60-61	70-71	80-81	90-91	00-01	09-10
Azzaba	1957-1958 / 2009-2010					
Pont M'dez	1958-1959 / 2009-2010					
Ait Khabach	1970-1971 / 1980-1981					
Dar El Hamra				1984-1985 / 2009-2010		
El Mers				1981-1982 / 2009-2010		

La méthode des doubles cumuls met en évidence une rupture dans l'hydrométrie de part et d'autre de l'année hydrologique 1994/1995. La précision au m^3/s près adoptée par les services gestionnaires aboutit en pratique à minorer les débits. Cela est peu sensible à la station de Mdez ou d'Azzaba pour lesquels les débits sont fréquemment largement supérieurs au $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig.4.3). Par contre pour les stations qui enregistrent le plus souvent des débits inférieurs à $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ la minoration du débit est amplifiée comme l'illustre le cas de la station d'El Mers.

Figure 4.3 : Modules cumulés aux stations d'Azzaba, de Pont de Mdez (1958/59 à 2009/10) et d'El Mers (1982/83 à 2009/10)



Il apparaît donc que le changement des pratiques hydrométriques engendre des séries de débits hétérogènes. De fait ceci entache notre analyse d'incertitudes et limite la portée des conclusions de notre étude.

La méthode du double cumul met également en évidence une rupture au niveau de l'année hydrologique 1980/81, année charnière entre les périodes pluviométriques humide et sèche. On peut y voir un assèchement lithologique plus rapide dans l'amont du bassin par rapport à l'aval ce qui est à rapporter au complexe sourcier à l'amont d'Azzaba dont Nejari (2002) avait déjà démontré qu'il avait réagi plus tardivement à la sécheresse pluviométrique.

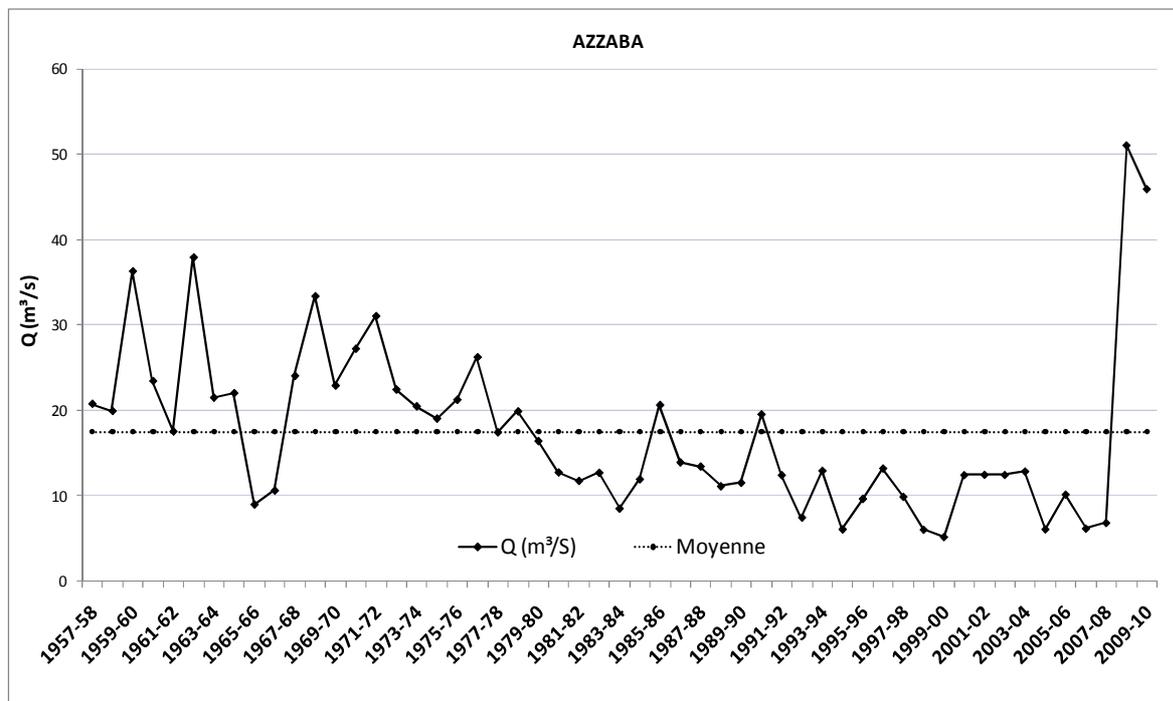
II- Caractéristiques globales des débits aux stations

Les modules (interannuels, annuels) et les régimes des débits définissent le comportement moyen des cours d'eau en mettant en valeur leurs caractères permanents (Lebaut, 2000). L'objectif principal de leur étude est de détecter la variabilité temporelle et spatiale des débits en grande partie tributaire de celle des pluies, et de caractériser le contexte des cours d'eau drainant le bassin du Haut Sebou.

1- Modules et des débits moyens annuels

1-1- Modules

Sur la chronique 1958/59 à 2009/2010 ils sont respectivement de 17.5 m³/s et 6.0 m³/s aux stations d'Azzaba et Pont de Mdez pour un coefficient de variation de 71 et 57 % (tab.4.2, fig.4.4). La moins grande variabilité des débits associée à un doublement du débit spécifique à la station d'Azzaba par rapport à celle de Pont de Mdez souligne l'influence majeure du complexe sourcier Aïn Sebou, Timedrine et Oumender, situé en rive droite entre les deux stations et cela d'autant plus qu'entre les deux stations les apports du bassin du Zloul ont une forte variabilité interannuelle (93%). Les bassins du Mâassèr et de l'amont du Guigou-Sebou présentent également une grande variabilité, supérieure à 70 %, pour des modules respectivement de 1.4 à 0.8 m³/s.

Figure 4.4 : Débits moyens annuels et module à la station d'Azzaba

Les statistiques descriptives des débits annuels fait ressortir les caractéristiques majeures du fonctionnement des bassins versants (tab.4.2).

Pour la station d'Aït Khabach, le faible débit spécifique ($0,67 \text{ l/s/km}^2$), malgré les sources importantes d'Aberchan et de Titzil confirme le caractère éminemment filtrant des formations géologiques du bassin. En effet ce faible rendement ne peut être entièrement expliqué par les prélèvements importants pour irrigation dans la plaine du Guigou.

Les faibles débits spécifiques ($1,46 \text{ l/s/km}^2$) à la station d'El Mers s'expliquent également par le caractère filtrant des formations marno-calcaires du Bathonien et vraisemblablement des écoulements souterrains vers l'extérieur de ce bassin versant. Le fort coefficient de variation traduit néanmoins une faible capacité de ces formations.

A la station de pont de Mdez les débits spécifiques deux fois supérieurs à ceux d'Aït Khabach, alors que le contexte climatique est comparable, traduisent sans conteste un apport extérieur.

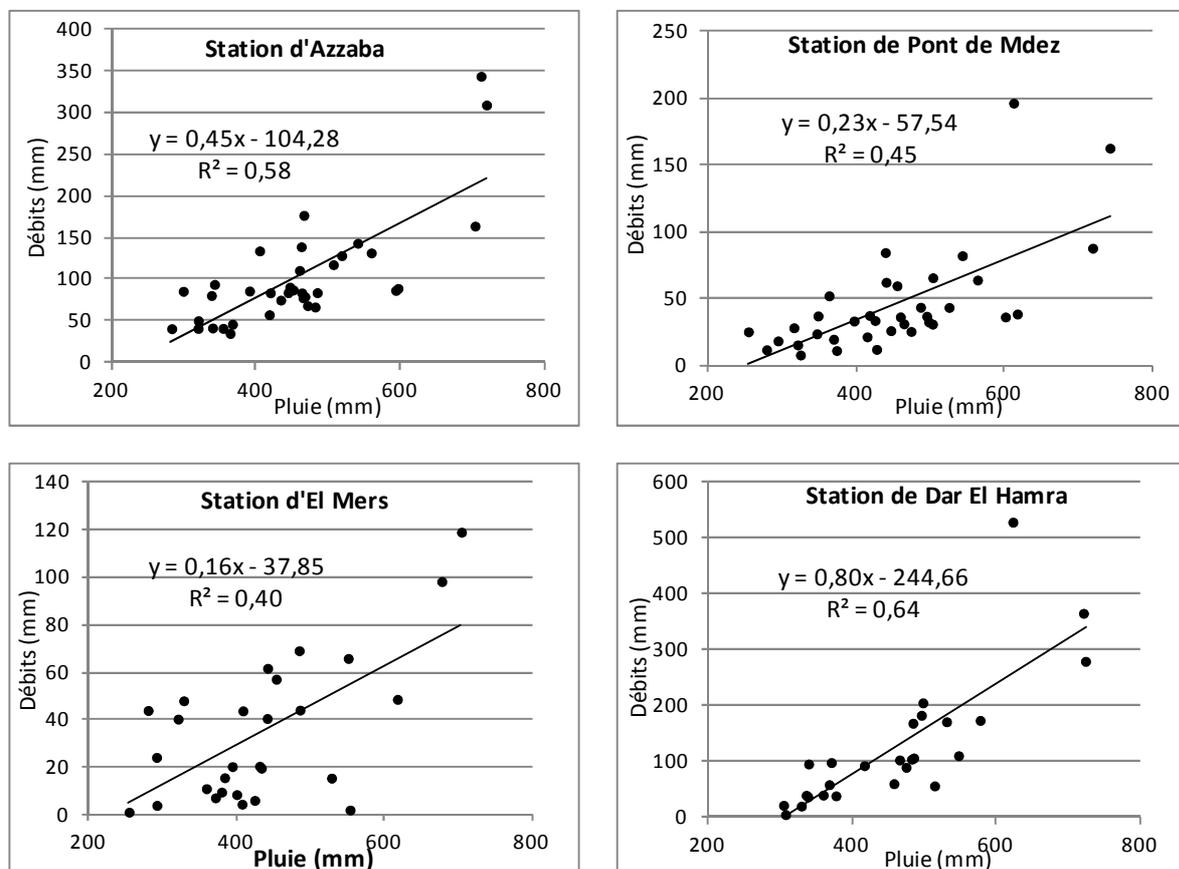
Le bassin de Zloul à Dar El Hamra est le plus productif des bassins avec un rendement de 4,68 l/s/km². Ce bassin bénéficie d'une part du môle pluviométrique du Jbel Bou Iblane et d'autre part une extension importante de formations imperméables.

Tableau 4.2 : Statistiques des 5 Stations implantées dans le bassin versant du Haut Sebou

B.V.	Stations	Période	surface (km ²)	Module (m ³ /s)	Ecart type (m ³ /s)	Coefficient de variation (%)	Lame d'eau (mm)	Q spécifique (l/s/km ²)	Pluie (mm)	DE (mm)
Guigou-Sebou	Ait Khabach	1971-72/1981-82	1200	0,8	0,6	74	31	0,7	522	491
Maaser	El mers	1984-85/2009-10	985	1,4	1,2	87	45	1,5	439	394
Guigou-Sebou	Pont Mdez	1984-85/2009-10	3460	6,0	4,3	71	44	1,4	442	398
Zeloul	Dar El Hamra	1984-85/2009-10	640	3,0	2,8	93	148	4,7	459	311
Sebou	Azzaba	1984-85/2009-10	4677	17,7	10,0	57	94	3,0	455	361

La station d'Azzaba, dont le débit spécifique est 3 l/s/km², englobe l'ensemble des apports des bassins en amont et son abondance relative est essentiellement liée aux débits des sources karstiques en aval de la confluence avec l'oued Zloul. L'impact de ce complexe sourcier se traduit également par la plus faible variabilité des débits

Figure 4.5 : Relation pluie/débits aux stations

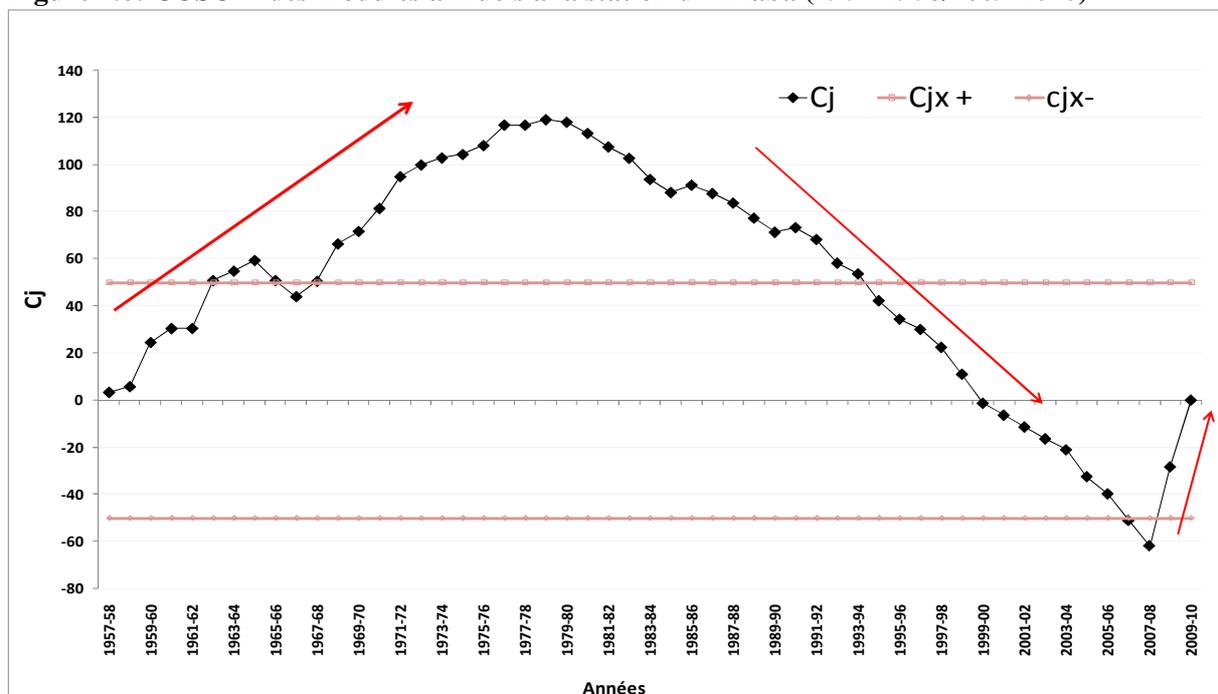


Donc comme de nombreux auteurs l'ont montré, le rôle des nappes est prépondérant dans le fonctionnement du bassin versant du Haut Sebou ce qui se traduit également par la médiocre relation pluie/débit à l'échelle annuelle (fig.4.5), le meilleur coefficient de détermination étant de 0.64, à la station de Dar El Hamra. En effet le fonctionnement des nappes diffère une partie de l'eau d'une année sur une autre, bien que l'année hydrologique soit considérée. Mais on peut également citer deux autres facteurs à l'origine de cette faible relation. Le premier concerne les limites de la quantification spatiale des précipitations (cf. chapitre 3). Le deuxième facteur est traité à la structure différente des pluies d'une année à l'autre, comme l'a montré la plus ou moins forte performance du modèle PLS de spatialisation des pluies à l'échelle annuelle, ce qui accentue la non-linéarité de la relation pluie/débit.

1-2- CUSUM des débits

Au-delà du module, les débits annuels suivent la tendance des séries pluviométriques sèches et humides. La méthode du CUSUM met en évidence l'hétérogénéité de la période 1957/58-2009/10 et distingue 3 séries (fig.4.6).

Figure 4.6: CUSUM des modules annuels à la station d'Azzaba (1957-1958/2009-2010)



A cet égard, à l'échelle du bassin du Haut Sebou, la nature perméable du substratum génère une redistribution des volumes d'eau infiltrés au sein du bassin mais également vers l'extérieur. En effet, une partie des précipitations recueillies sur ces bassins versants est

transféré par le réseau souterrain pour alimenter l'aquifère d'Oum Rabiaa (Ben Tayeb & Leclerc, 1977).

L'analyse de C_j met en évidence 3 séries dans la chronique 1957-58/2009-10 de la station d'Azzaba. Après une tendance humide qui a duré 21 ans (1957-58/1977-78) où les modules dépassent la bande positive avec une moyenne de 22,9 m^3/s , le bassin a connu une tendance sèche (1978-77/2007-08) dont le débit moyen est de 11,2 m^3/s . Cette série sèche d'une trentaine d'années s'est arrêtée en 2008/09 après une séquence marquée par une sécheresse sévère entre 2004-2005 et 2007-2008 (tab.4.3).

Tableau 4.3: Découpage de la chronique des débits d'Azzaba 1957/58 – 2009/2010 en périodes homogènes

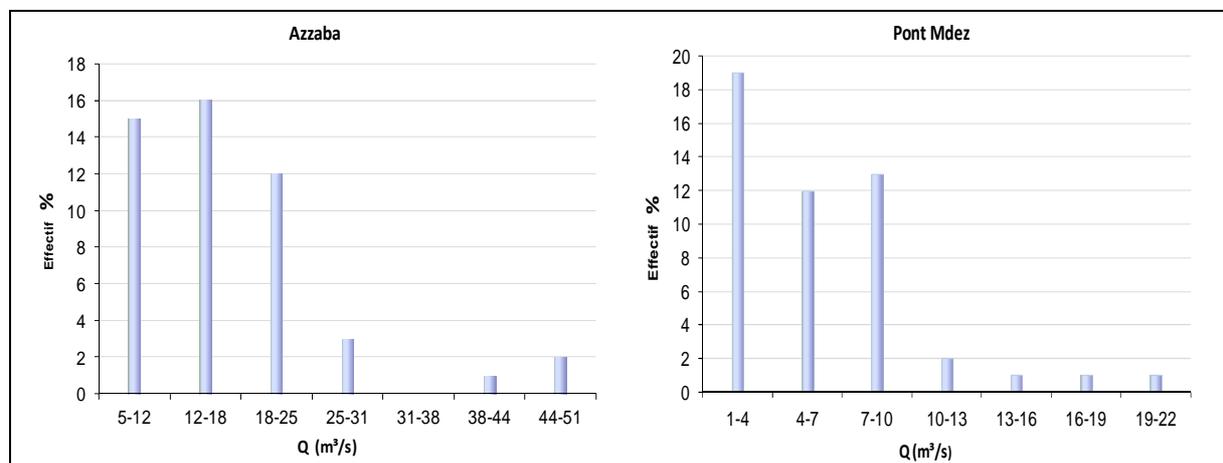
Période	Moyenne m^3/s	Ecart-type	nombre d'années	Diagnostic
1957/58 - 1978/79	22,93	7,12	21	Humide
1979/80 – 2007/2008	11,26	3,79	28	Sec
2008/2009 – 2009/10	48,54	/	2	Humide

2-Etude statistique des débits annuels (1958-59/2009-10)

L'analyse fréquentielle d'une longue série de débits permet d'estimer le temps de retour d'une valeur particulière. Il s'agit d'une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, afin d'en définir les probabilités d'apparition future (Giret, 2007).

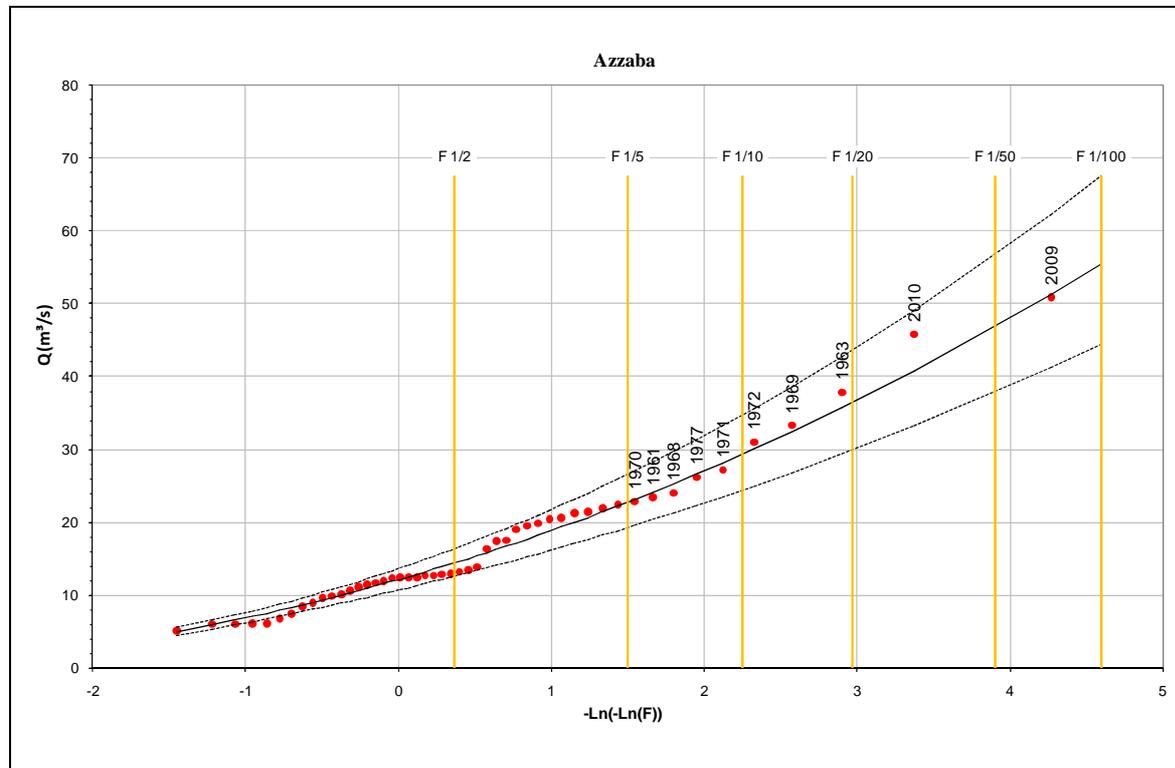
La distribution des modules (fig.4.7) dissymétrique positive met en évidence le caractère évènementiel des valeurs supérieures à 31 m^3/s à Azzaba et 13 m^3/s à Pont de Mdez.

Figure 4.7: Distribution des modules aux stations d'Azzaba et Pont Mdez (1958-59/2009-10)



L'analyse statistique des séries de modules aux stations a été menée à partir des lois statistiques les plus couramment utilisées pour ces données. Plusieurs lois ont été testées et le meilleur résultat d'ajustement est obtenu par la loi "Racine Gumbel" (fig.4.8 et annexe 4. 3).

Figure 4.8 : Ajustement des modules à la station d'Azzaba



Le tableau 4.4 récapitule les résultats des fréquences des modules annuels et leurs temps de retours.

Tableau 4.4 : Fréquence et durée de retour des modules sur le Haut Sebou

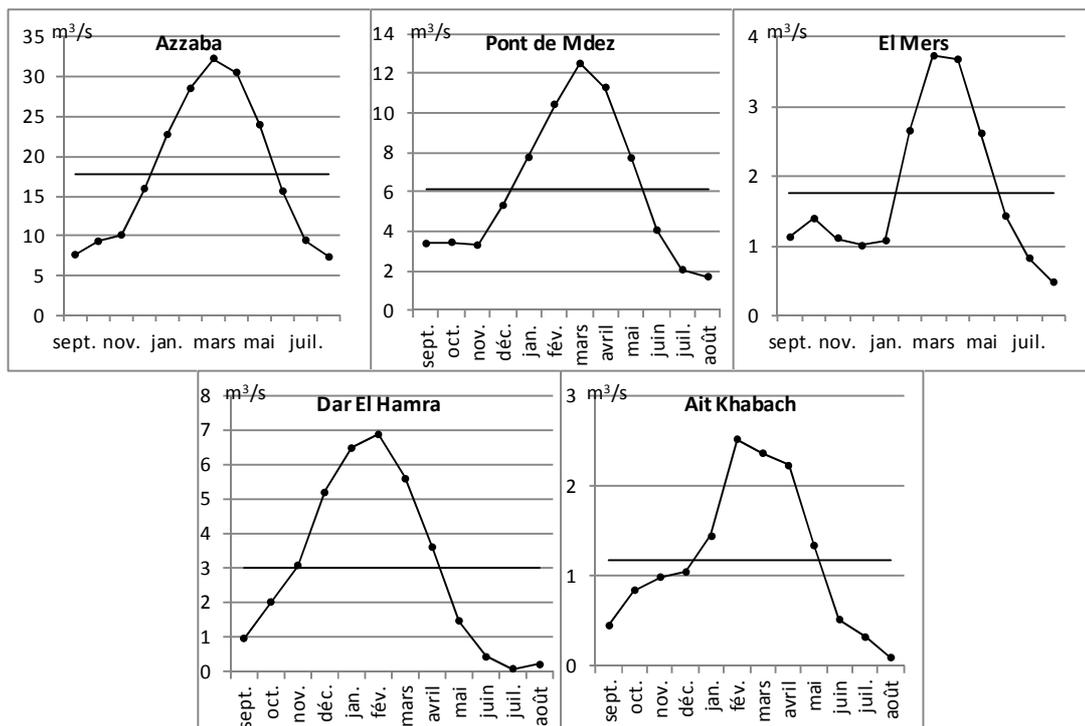
Fréquence	Période	1 / 2	1 / 5	1 / 10	1 / 50	1 / 100
Temps de retour		2 ans	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
Azzaba	1958-59 / 2009-10	14,7	23,2	29,4	44,6	55,4
Pont Mdez	1958-59 / 2009-10	4,8	8,6	11,7	20,1	24,4
Dar El Hamra	1984-85 / 2009-10	2	4,5	6,9	14,5	14,7
El Mers	1981-82 / 2009-10	0,8	2,1	3,4	7,8	10,5

La chronique de 52 années a enregistré des débits de durée de retour de 75 ans pour les stations d'Azzaba et de Pont de Mdez avec respectivement $51,7 \text{ m}^3/\text{s}$ et $21,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour les chroniques plus courtes d'une vingtaine d'années, les débits les plus forts aux stations de Dar El Hamra et El Mers sont respectivement de $12,6 \text{ m}^3/\text{s}$ et $5 \text{ m}^3/\text{s}$, d'une durée de retour trentennal.

3- Les régimes hydrologiques

Le régime hydrologique d'un cours d'eau se définit par les variations de son débit habituellement représentées par le graphique de l'écoulement mensuel moyen, calculé sur un certain nombre d'années. Par la répartition des hautes et basses eaux autour du module il permet de mettre en évidence les variations saisonnières qui sont essentiellement fonction des conditions climatiques.

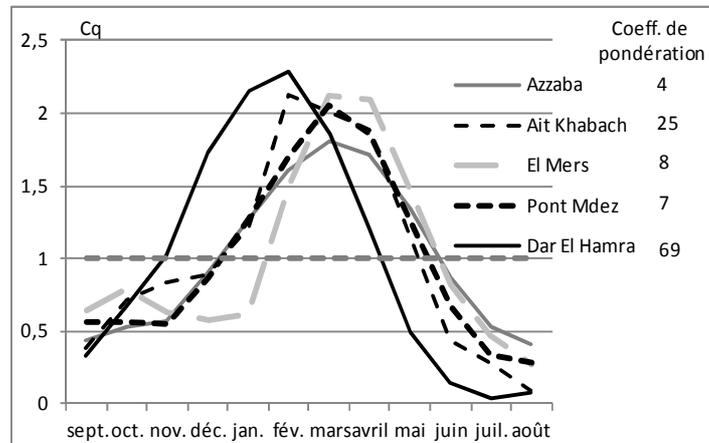
Figure 4.9 : Régimes hydrologiques aux stations en débits bruts



Excepté pour la station de Dar El Hamra, le régime hydrologique est le même pour toutes les stations avec 7 mois de basses eaux, de juin à décembre et 5 mois de hautes eaux de janvier à mai (fig.4.9). Le régime aux stations d'El Mers et Pont de Mdez est également pondéré, le coefficient de pondération est respectivement de 7 et 8 (fig.4.10) ce qui compte tenu de la quasi absence de précipitations utiles l'été et des prélèvements pour l'agriculture, souligne à nouveau le rôle non négligeable des nappes d'eau souterraines. Compte tenu de ce qui précède, la forte pondération du régime hydrologique à la station d'Azzaba, coefficient de 4, renforce l'idée que le fonctionnement hydrologique du bassin du Haut Sebou à sa sortie du Moyen-Atlas est largement gouverné par une redistribution souterraine d'eau ce qui est conforme à la faible variation interannuelle des modules. Donc une partie de l'eau infiltrée au sein du bassin, et qui n'est pas comptée aux stations intermédiaires, est réaffectée aux cours

d'eau entre pont de Mdez et Azzaba soit sous la forme ponctuelle du complexe sourcier ou d'autres sources au sein même du lit du cours d'eau.

Figure 4.10: Coefficients mensuels de débits aux stations



Par contre à l'amont, le fort coefficient d'immodération (65) des débits à la station d'Aït Khabach démontre que la nappe des basaltes est faiblement capacitive bien qu'il faut tenir compte également de la très forte pression sur la ressource en eau de surface dans la plaine du Guigou.

Au final, à partir de chroniques renfermant 15 années de plus que celles qu'a utilisées Nejjari dans son travail de thèse (2002), tant l'étude des modules que du régime des débits démontrent à nouveau le caractère drainant des formations géologiques dans le haut Sebou et corrélativement une redistribution souterraine des pluies utiles au sein du bassin versant. Sur cette base nous pouvons proposer une synthèse des écoulements sur le bassin du Haut Sebou à la station d'Azzaba.

4-Synthèse des écoulements à l'échelle moyenne annuelle

Sur la base des valeurs de précipitations et d'ETR spatialisées ainsi que des débits enregistrés aux stations (tab.4.5) nous proposons une synthèse des écoulements sur le bassin du haut Sebou (fig.4.11). Cette proposition repose sur les données des années hydrologiques 1984/85 et 1985/86, années avec le maximum de données communes).

Tableau 4.5 : Données du bilan hydrologique pour deux années particulières

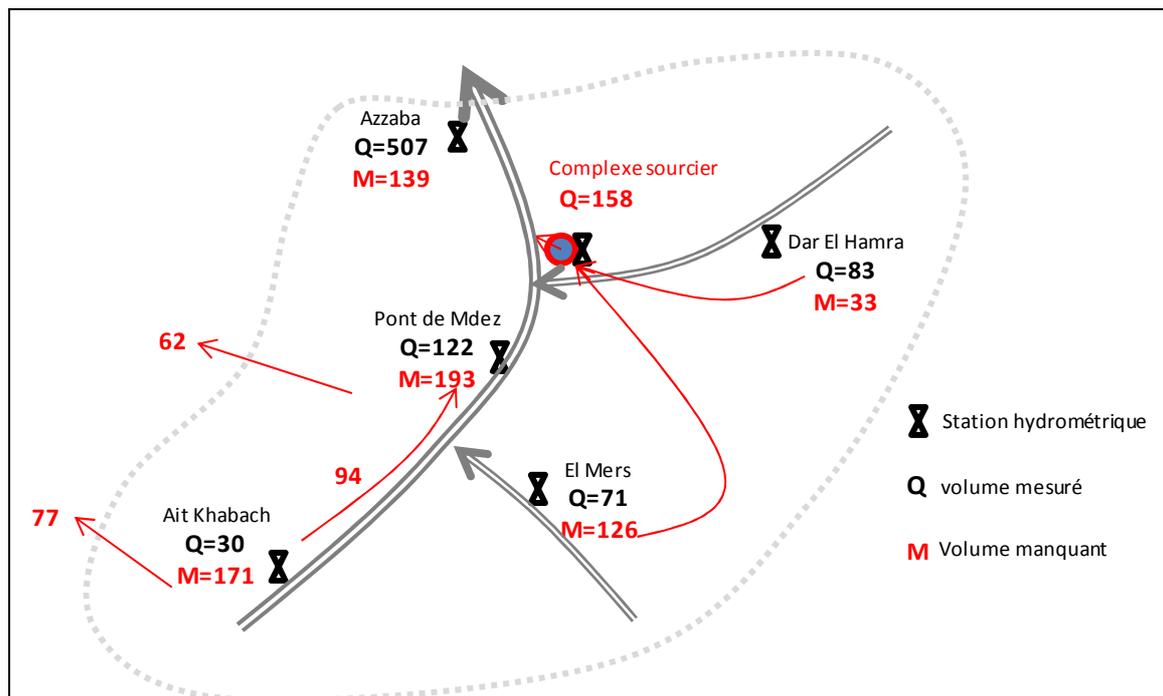
mm	Azzaba			Pont Mdez			El Mers			Ait Khabbach			Dar El Hamra		
	Q	pluie	ETR	Q	pluie	ETR	Q	pluie	ETR	Q	pluie	ETR	Q	pluie	ETR
1984/85	80	338	201	19	295	186	40	320	192	25	350	182	39	378	216
1985/86	137	462	218	52	364	196	69	484	210	25	457	195	182	496	236
moyenne	108	400	210	35	330	191	54	402	201	25	404	189	111	437	226

Pour construire cette proposition nous sommes partis des éléments du contexte structural du bassin versant et des analyses faites par Akdim et al (2011) et Nejjari (2002). Sur cette base nous postulons que le complexe sourcier des sources Aïn Sebou, Timedrine et Ouamender auxquelles ont peut ajouter des venues d'eau via le lit est alimenté presque exclusivement par les infiltrations à partir des bassins de rives droites du Sebou, le Maâsser et le Zloul. L'alimentation de ce complexe hydroKarstique a produit différentes hypothèses (el Khalki, 1990 ; Nicod 1993 ; Nejjari 2002 ; et Akdim et al., 2011). Ces derniers confirment que si tous les auteurs sont d'accord sur le rôle que jouent les roches carbonatées liasiques dans l'infiltration des eaux pluviales qu'ils drainent pour alimenter des réservoirs souterrains, les affleurements carbonatés signalés par les divers auteurs sont réduits et non argumentés (Akdim et al., 2011) Dans ce contexte, Gille (2010) pose la question suivante " Les débits monstrueux d'Aïn Sébou viennent-ils de la rive gauche ?" (Plutôt oui pour moi, plutôt non pour les collègues de Fès...) répond Gille. Dans un premier temps ceci a nécessité de revoir à la hausse (+25%) les valeurs ETR Modis, soit en moyenne environ 40 mm/an. Sur la base de cet équilibre les 158 hm³ du complexe sourcier correspondent aux 33 hm³ et 126 hm³ respectivement provenant du Zloul et du Maâsser (tab.4.6). Cet apport étant interne au bassin du Sebou il ne compense pas les 139 hm³ manquant à la station d'Azzaba. Dans ce cas nous posons l'hypothèse qu'ils sont transférés vers des bassins versants de rives gauches via les basaltes et calcaires du cause du Guigou à l'amont d'Aït Khabach pour 77 hm³ et via les calcaires de ce même cause à l'amont de Pont de Mdez pour 62 hm³.

Tableau 4.6 : Volumes du débit et de la différence avec le débit théorique

Hm ³	Azzaba	Pont Mdez	El Mers	Ait Khabach	Dar El Hama
Q	507	122	71	30	83
Q(pluie-ETR)	384	358	144	228	75

Notre schéma implique également un transfert de 94 hm³ de l'amont d'Aït Khabach vers le bassin à l'amont de la station de Pont de Mdez. Ces transferts depuis l'amont du Guigou vers notamment l'Oued Oum Er Rbia sont également proposés par de nombreux auteurs. La différence entre débits mesurés à Azzaba (507 hm³) et la somme de ceux mesurés à l'amont (434 hm³) correspond au débit produit (73 hm³) sur les bassins à l'aval des stations.

Figure 4.11 : Synthèse des écoulements annuels moyens dans le bassin du Haut Sebou (en hm³)

Conclusion du chapitre 4

L'analyse des données hydrologiques montrent des séries temporellement et qualitativement hétérogènes. A compter de l'année 1995 les relevés par limnigraphes ont été abandonnés au profit de relevé tri-quotidien par un observateur et la précision de la valeur de débit produite est de l'ordre du m³/s. Ceci limite de fait la portée des analyses qui sont faites. Néanmoins à l'échelle annuelle on note que les écoulements se calent sur les séries pluviométriques sèche et humide. L'hétérogénéité des écoulements est également spatiale puisque le rapport des débits spécifiques est de 7 entre l'amont à Aït Khabach et le bassin du Zloul.

La synthèse sur les volumes écoulés aux stations met en évidence l'intensité des écoulements souterrains dans l'ensemble du bassin dans lequel la partie amont semble contribuer à l'alimentation de bassins versants contigus du Haut Sebou alors que ses affluents de rives droite semblent contribuer à l'alimentation du complexe sourcier situé à l'amont d'Azzaba.

****Chapitre 5 : Les phases hydrologiques**

Sommaire

I-Les crues

1- Intérêt des recherches sur les crues

2-Les débits de crue annuels

3-Les écoulements rapides de crue

4-Résultats

4-1-Les coefficients d'écoulement rapide de crue (ERC)

4-2-Les volumes d'eau annuels des phases de crue

II-Les étiages et le tarissement du Haut Sebou

1-Les étiages

1-1-Problématique

1-2-Définition

2-Définitions statistiques des débits d'étiages

3-Caractéristiques des étiages du Haut Sebou

3-1- Les QMNA : l'étiage au pas de temps mensuel

3-1-1- Analyse fréquentielle des débits d'étiages (QMNA)

a-Ajustement des QMNA

3-2- Les VCNd : l'étiage au pas de temps journalier

4-Tarissement des débits des cours d'eau

4-1-L'extraction des épisodes de tarissement

4-2-L'exploitation des phases de tarissement

4-2-1- Les courbes maîtresses de tarissement (Master Recession Curve)

a- La méthode de corrélation

b-Matching Strip method (M. S. M)

4-3-Longues phases de tarissement observées et tarissement moyen

Introduction du chapitre 5

La connaissance des phases hydrologiques, crue et tarissement, joue un rôle très important dans la conception de la gestion des ressources en eau. En effet elles dépendent des processus à l'œuvre dans le bassin versant et leur quantification traduit le rôle des facteurs géologiques sur l'écoulement et le stockage de l'eau dans le bassin lors d'un épisode pluvieux ou lors de périodes sans précipitation. Leur caractérisation est donc un préalable à toute étape de modélisation. La quantification des phases hydrologiques se fait à partir de courtes chroniques correspondant soit à un épisode pluvieux (écoulement rapide de crue) soit à un épisode sans précipitations (tarissement).

Ce chapitre s'attache dans un premier temps à l'analyse des crues. Dans un deuxième temps nous étudions des phases de tarissement et les étiages. Ces analyses porteront sur des chroniques de taille variables comprises entre 11 et 51 ans en fonction de la disponibilité des données.

I- Les crues

Les crues représentent le volume d'eau qui s'écoule rapidement vers l'exutoire et qui de fait ne constitue pas véritablement de ressource exceptée la partie maîtrisée, détournée instantanément pour un usage. Par contre les crues jouent un rôle important dans le remplissage des barrages et par conséquent dans la mise en place de ressources en eau pour l'irrigation ou d'autres usages.

Il existe de nombreuses définitions du phénomène « crue » dans la bibliographie. On retient celle proposée dans le dictionnaire de l'environnement : « gonflement au dessus du débit normal des eaux d'un cours d'eau à la suite de précipitations atmosphériques ou de fontes des neiges ». Les crues représentent un phénomène aléatoire dont on connaît la nature et les mécanismes mais dont on ignore les moments et les lieux d'apparition (El Ghachi, 2007). Pardé (1933) indique que les crues sont « les épisodes les plus dramatiques de l'hydrologie alors que Chartier (1960) insiste sur le fait que la crue ne désigne pas « les hautes eaux ordinaires, saisonnières, définies par les moyennes mensuelles et les débits, mais il s'agit des phénomènes différents, amplifiés, soit isolés, soit survenant en séries » parfois d'une manière capricieuse, imprévue, parfois à des dates attendues à quelques semaines ajoute Pardé (1949). Se détachant des hautes eaux soutenues habituelles ou surgissant au-dessus de débits normaux ou bas, les crues sont le plus souvent générées par des facteurs météorologiques qui se sont

manifestés avec une intensité particulière (grandes averses, fontes des neiges ou de glaces, embâcles de glaçons et débâcles consécutives...) ou par la rupture d'un barrage naturel ou artificiel.

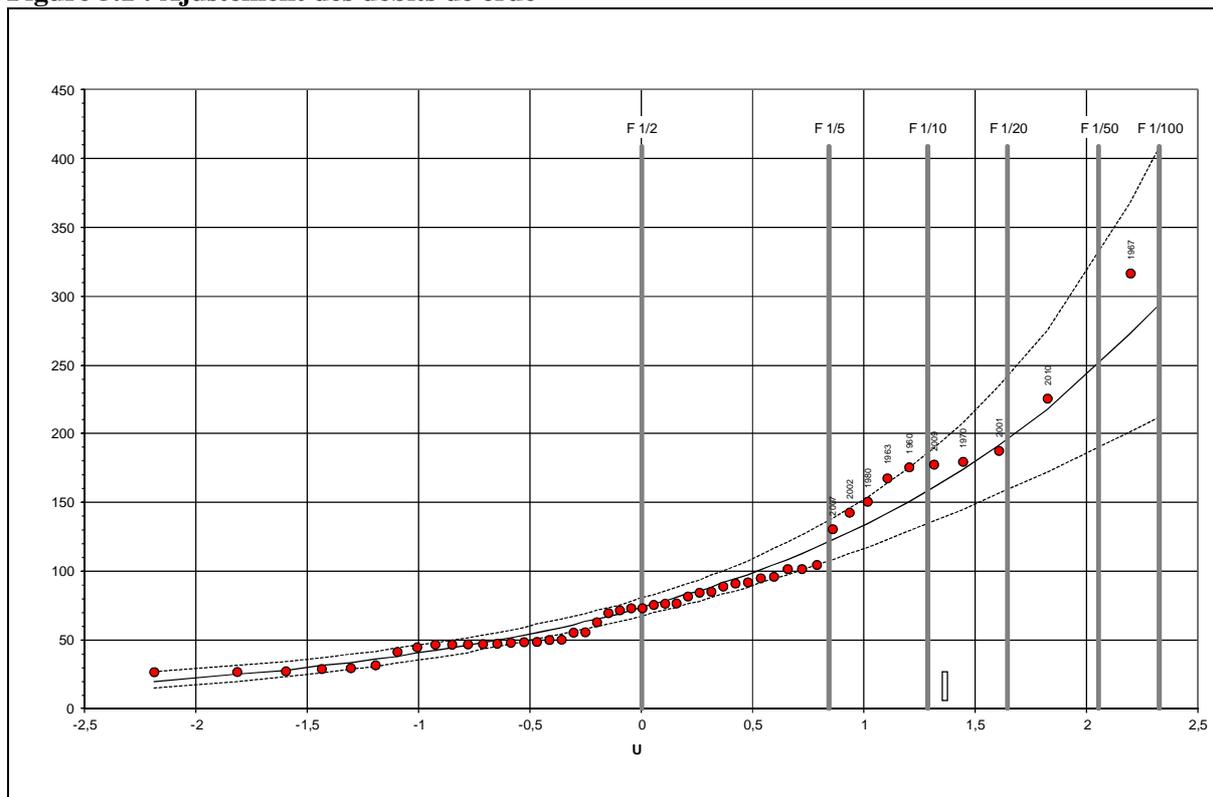
1- Intérêt des recherches sur les crues

Compte tenu de son rôle dans la vie des rivières, la compréhension approfondie des crues présente un intérêt scientifique et pratique de premier ordre, « non seulement pour les Potamologues, mais encore pour les Climatologues, les Morphologues, les Hydrauliciens, les Ingénieurs, les Urbanistes... » (Charier, 1960). Les géographes s'intéressent aussi à l'étude de la genèse des inondations comme conséquence des crues et résultante d'une inadéquation du lit mineur ou moyen aux débits générés par des facteurs météorologiques ou autres facteurs comme il a été mentionné auparavant. Lors d'épisodes pluvieux trois phénomènes complémentaires régissent le cheminement de l'eau : l'écoulement rapide de crue (ERC), l'infiltration dans le sol puis vers les nappes et l'interception, (Horton, 1919. In Crouser, 1966). Dans notre travail l'étude des crues a pour principal objectif la quantification du volume d'eau généré par l'ERC et par la même établir le coefficient de ruissellement.

2- Les débits de crue annuels

En préalable à l'analyse des phases d'écoulement de crue l'analyse fréquentielle des débits moyens journaliers maxima apporte une connaissance sur les débits maxima produits par les bassins versants. Pour 3 stations disposant d'une chronique suffisamment longue c'est la loi "Ln Normale" qui donne les meilleurs ajustements. Pour les débits journaliers maxima de la station de Dar El Hamra c'est la loi "racine Gumbel" qui est retenue.

Figure 5.1 : Ajustement des débits de crue



Les débits les plus élevés aux stations aval d’Azzaba et de Pont de Mdez ont été produits dans les années 1960 alors que les pluies maximales enregistrées sont celles des années 2008 à 2010. Ceci renvoie à l’état initial vraisemblablement plus favorable dans la période humide des années 1960 qu’à l’issue de la période sèche de près de 3 décennies. A la station d’Azzaba le plus fort débit observé, de 489 m³/s, a une durée de retour de 70 ans. Par contre à la station de Pont de Mdez le plus fort débit observé est centennal, il est de 317 m³/s. Pour les stations de Dar El Hamra et d’El Mers les débits les plus forts observés sont respectivement de 272 m³/s et de 573 m³/s pour une durée de retour de 30 ans et de 40 ans. Cette dernière valeur, de l’année 2009 nous paraît surestimée car 3 fois supérieure à celle de 2010 et sort assez nettement du rail de confiance de l’ajustement, quelque soit la loi utilisée.

Tableau 5.1 : Débits de crues fréquentiels aux stations du Haut Sebou

Fréquence	Période	1 / 2	1 / 5	1 / 10	1 / 50	1 / 100
		2 ans	5 ans	10 ans	50 ans	100 ans
Azzaba	1958-59 / 2009-10	121.7	203.9	269.8	447.6	535.1
Pont Mdez	1958-59 / 2009-10	72.3	120.8	159.8	264.5	316.7
Dar El Hamra	1984-85 / 2009-10	77.9	138.2	176.5	255.2	286.4
El Mers	1981-82 / 2009-10	41.1	100.0	153.2	310.1	392.9

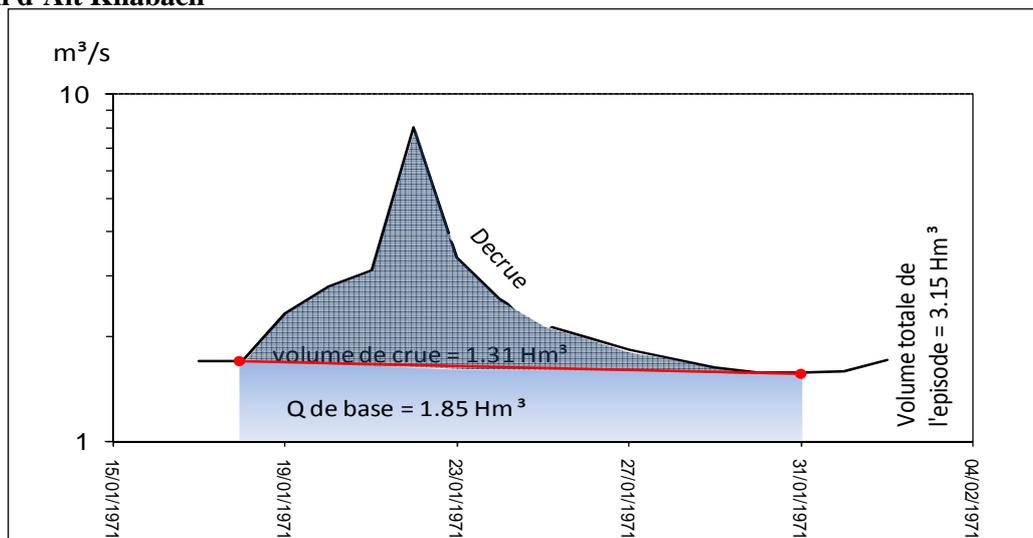
En période de crue c'est le bassin du Zloul qui est le plus productif avec 425 l/s/km^2 observés et atteignant 447 l/s/km^2 en fréquence centennale. Sur le bassin du Mâassèr 153 l/s/km^2 ont été observés pour une production centennale pouvant atteindre 397 l/s/km^2 . A la station de Pont de Mdez le débit centennal correspondant au débit le plus fort observé correspond à un rendement du bassin de 91 l/s/km^2 . Enfin à Azzaba le plus fort débit observé renvoie à une production d'eau de 87 l/s/km^2 qui peut aller jusqu'à 147 l/s/km^2 en fréquence centennale.

3- Les écoulements rapides de crue

La première étape a consisté à repérer les épisodes pluvieux sur les hyétogrammes (pas de temps journalier) de l'ensemble des stations pluviométriques disponibles et d'extraire les phases de crue correspondantes.

Dans un deuxième temps les hydrogrammes de crue ont fait l'objet d'une décomposition logarithmique (Roche, 1963) ; Sur la base des débits reportés sur papier semi-log, « on admet que le passage d'un segment à l'autre témoigne d'une rapidité d'écoulement différente et donc d'un changement dans les processus de transfert » (Cosandey & Robinson, 2000). Cette procédure, réalisée dans une feuille « Excel » (fig.5.2), a permis de fixer les dates et les valeurs de débit bornant les phases de crue. Soulignons que compte tenu du caractère brutal des événements il est préférable de travailler avec des données de débits et de pluies à pas de temps horaires. Dans notre cas nous ne disposons que de données journalières (Q_{mj}), cependant cette faible résolution temporelle est compensée par la taille relativement importante des bassins versants (inertie).

Figure 5.2 : Décomposition d'un hydrogramme de crue ; épisode de (18/01/1979-31/01/1971) à la station d'Aït Khabach



Le coefficient d'écoulement rapide de crue pour un épisode est calculé comme le rapport entre la pluie à l'origine de la crue et le volume de crue. Dans la mesure où ne nous disposons que de la pluie mensuelle spatialisée c'est celle-ci qui est rapportée au volume de la crue.

Enfin, chaque épisode de crue est caractérisé par son volume de base, d'écoulement rapide et par sa durée. Ainsi la contribution de l'écoulement rapide de crue au volume total annuel écoulé dans le bassin versant a pu être calculée.

4- Résultats

La longueur des chroniques de débits étant différente le nombre de phases extraites par stations est variable. Aux stations d'Azzaba et de Pont de Mdez sur les 53 ans de données plus de 500 épisodes de crue ont été extraits, respectivement 529 et 544 (tab.5.3 et annexe 5.2). Aux stations d'Aït Khabach, El Mers Dar El Hamra, le nombre d'épisodes est respectivement de 23, 80 et 148.

4-1- Les coefficients d'écoulement rapide de crue (ERC)

Mise à part pour la station de Dar El Hamra il a été possible de calculer des ERC pour chaque mois. Les coefficients d'ERC sont extrêmement variables et ne présentent aucun régime mensuel (tab.5.2). La forte variabilité exprimée est le fait d'une ou deux valeurs très élevées, la moyenne renvoie donc au mode.

Tableau 5.2 : Moyenne des coefficients d'ERC mensuels et écart type

		Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août
Azzaba	moyenne	0,06	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04	0,06
	coef. var.	137%	104%	88%	120%	97%	108%	114%	73%	83%	97%	87%	123%
Pont Mdez	moyenne	0,04	0,04	0,04	0,06	0,02	0,09	0,05	0,03	0,05	0,06	0,06	0,07
	coef. var.	103%	169%	181%	281%	161%	84%	84%	89%	112%	189%	112%	216%
Dar El H.	moyenne	0,17	0,08	0,12	0,10	0,14	0,14	0,10	0,19	0,08	0,03	\	0,23
	coef. var.	94%	90%	302%	84%	90%	77%	96%	160%	98%	\	\	83%
El Mers	moyenne	0,02	0,02	0,02	0,06	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,04	0,04	0,02
	coef. var.	115%	73%	187%	213%	70%	133%	58%	101%	139%	88%	104%	43%

Globalement, excepté à la station de Dar El Hamra les coefficients d'ERC sont faibles, de l'ordre de 5% aux stations de Pont de Mdez et d'Azzaba et 3 % à la station d'El Mers. Sur le bassin du Zloul les coefficients d'ERC mensuels dépassent le plus souvent 10 % avec des valeurs de l'ordre de 20 % pour avril, août et septembre. Ces valeurs plus élevées sont à relier au pourcentage de substratum peu perméable (marno-calcaire) et imperméable (marne, schiste). En outre les valeurs élevées d'août et septembre assortie d'un relatif faible

coefficient de variation témoignent vraisemblablement des fréquents épisodes orageux d'été sur le Jbel Bou Iblane.

4-2- Les volumes d'eau annuels des phases de crue

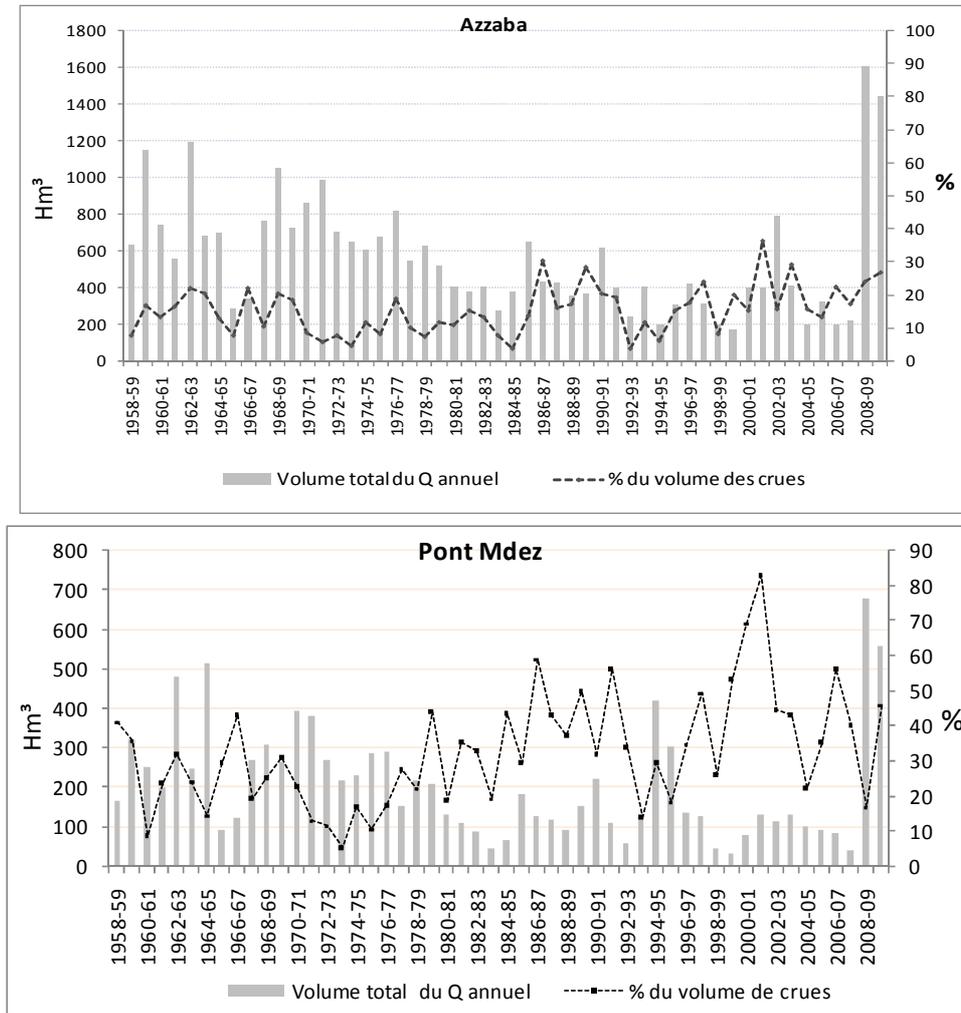
Le découpage des hydrogrammes permet de calculer la contribution des ERC aux écoulements totaux. Du point de vue de la ressource elle renvoie au volume d'eau qui échappe à toute utilisation mais qui pourrait être stocké dans le réservoir à l'amont du barrage de Pont de Mdez (Barrage Mdez)

Tableau 5.3 : Caractéristiques de l'écoulement pour les épisodes de crue aux stations

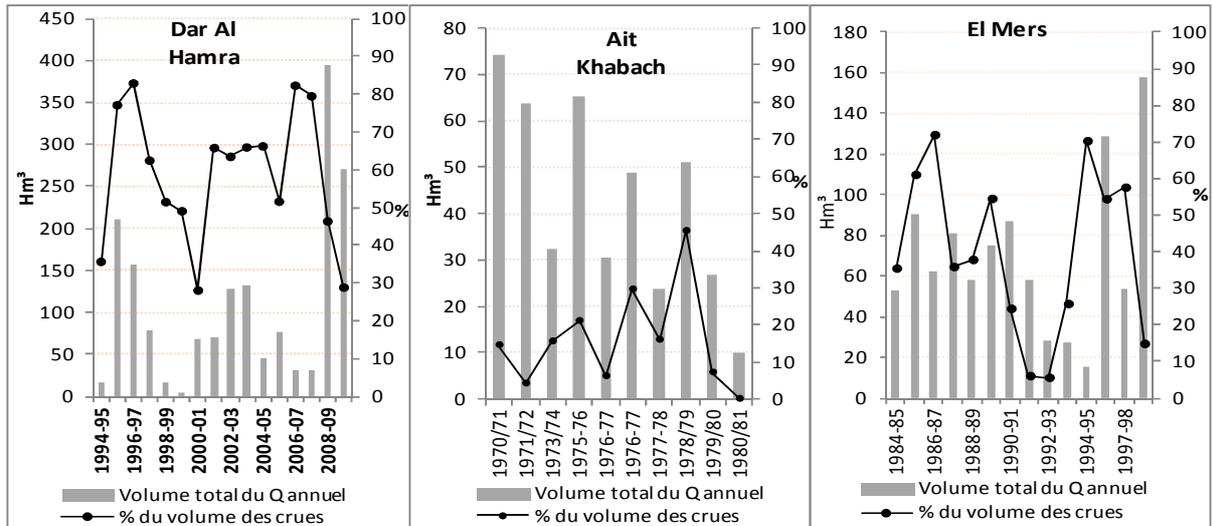
Station	Période	Nombre d'épisodes	volume de base moyen (hm ³)	volume de crue moyen (hm ³)	nombre de jours moyen de crue
Aït Khabach	1970-71/1981-82	23	36.1	7.2	32.1
El Mers	1984-85/2009-10	80	42.6	27.1	80.3
Dar EL Hamra	1994-95/2009-10	148	47.5	60.9	72.8
Pont Mdez	1958-59/2009-10	544	144.8	57.9	104.3
Azzaba	1958-59/2009-10	529	468.5	88.0	71.6

Cette analyse se heurte à une difficulté liée à l'absence d'une chronique commune entre toutes les stations afin de comparer entre les bassins. Il est cependant possible de mettre en évidence les traits caractéristiques des bassins vis-à-vis de l'écoulement de crue.

Le plus intéressant à retenir est la contribution des crues à l'écoulement total. Elle est variable d'une année à l'autre et d'un bassin à l'autre en fonction des types de temps prépondérants et des caractéristiques physiographiques de chaque bassin. Pour la station d'Azzaba, la contribution des crues au volume total annuel est de 15 % en moyenne et dépasse à peine 30% au maximum, pour l'année hydrologique 2002/03 d'indigence extrême (fig.5.3 et tab.5.3). Ceci illustre bien la capacité d'infiltration du substratum du bassin et l'importance de la contribution des nappes d'eau souterraine à l'écoulement et donc le rôle des apports parvenant du complexe hydrokarstique, Ain Sebou, Timedrine et Ouamander. A cet égard les 25 % de volume de crue seulement des années 2008 à 2010, aux débits les plus forts enregistrés sur la chronique (durée de retour de 75 ans) confirme cela.

Figure 5.3 : Volume total annuel écoulé et contribution des crues

Par contraste, à la station de Mdez la contribution des crues au volume annuel peut atteindre 85% comme le cas de 2002/2003 pour une moyenne de 32% pour la période étudiée. En revanche, pour les autres bassins (Zloul, El Mers), on note une forte contribution des crues au volume total annuel dont la moyenne sur la chronique étudiée est 52% à la station Dar El Hamra et 39% à la station d'El Mers. Certaines années les crues constituent plus de 80% au volume annuel comme le cas 1996-97 et 2006-07 à la station de Dar El Hamra par exemple. Ces deux bassins sont soumis à de nombreuses averses orageuses particulièrement en été et ont un substratum globalement moins perméables que les autres secteurs du bassin.

Figure 5.4 : Volume total annuel écoulé et contribution des crues**Tableau 5.4: Contribution minimum et maximum des crues au volume annuel du débit**

Station	Contribution moyenne (%)	Contribution minimum (%)	Année	Contribution Maximum (%)	Année
Azzaba	15.2	3.5	1992-93	36	2001-02
Pont Mdez	32.4	5.3	1973-74	82.7	2001-02
Dar El Hamra	58.5	30	2009-10	83	1996-97
El Mers	39.6	5.5	1992-93	57.5	1997-98
Aït Khabach	15.9	0.1	1980-81	45.2	1978-79

Tableau 5.5 : Caractéristiques de l'écoulement pour les périodes sèches et humides

Station	Période	volume total annuel moyen Hm³	Volume de base Hm³	Volume de crue Hm³	Nombre d'épisodes	% volume de crue par rapport au volume total
Azzab	1957 -58/ 1978-79	725	629	96	200	12
	1979- 80 / 2006-07	373	311	62	290	16
	2007- 08 / 2009-10	1084	818	266	39	22
Mdez	1957 -58/ 1978-79	269	205	64	222	22
	1979- 80 / 2006-07	128	83	45	303	40
	2007- 08 / 2009-10	425	297	128	19	34

Cette étude sur les crues démontre que les coefficients d'ERC sont très faibles excepté sur le bassin du Zloul. Malgré cela les crues participent à l'écoulement total pour une proportion pouvant aller jusqu'à près de 60 % pour le bassin du Zloul ce qui met en avant un fort déficit d'écoulement, ETR et transfert d'eau vers d'autres bassins. Au contraire pour Azzaba le volume de crue ne participe en moyenne qu'à hauteur de 15 % (tab.5.4) du volume total écoulé pour des valeurs d'ERC comparables à ceux du Mâassèr et de Pont de Mdez. Ceci traduit un déficit d'écoulement bien plus faible à Azzaba et une contribution très élevée des eaux souterraines aux débits à l'aval de pont de Mdez et de Dar El Hamra. L'étude qui suit

sur les étiages et les tarissements permet de caractériser cette contribution différenciée des nappes.

II- Les étiages et le tarissement du Haut Sebou

1-Les étiages

1-1-Problématique

Les bas débits et les débits d'étiage renvoient à la ressource en eau souterraine donc à l'eau « ultime » ou seuil inférieur de la ressource en eau disponible dans un bassin versant. Pour cette raison la statistique de ces valeurs est fondamentale pour une utilisation rationnelle et pour une gestion de la ressource sans déséquilibre à long terme. De la même manière, "à l'amont du processus de réflexion", la compréhension du phénomène de tarissement conduisant au débit d'étiage et le rapport qu'entretient celui-ci avec les précipitations annuelles apportent les clés d'une gestion efficace et prédictive de la ressource en eau pour les bassins stratégiques.

En effet, la connaissance des débits d'étiage est de première importance dans la gestion des eaux pour des aspects liés à l'estimation de la ressource disponible et à la préservation de la qualité du biotope rivière (Hingray et al., 2009 ; Stromberg et al., 2007). Qui plus est, la connaissance des débits d'étiage constitue un enjeu majeur pour une gestion cohérente de la ressource en eau. Comme le soulignent Hingray et al (2009) «longtemps négligés, les étiages prennent aujourd'hui une importance croissante aux yeux non seulement des hydrologues mais aussi des autorités et de la population. Cette prise de conscience résulte de la pression toujours grandissante sur la ressource en eau des rivières et du fait que les hasards climatiques et la variabilité saisonnière engendrent rarement une concomitance entre ressource et besoins.

Par ailleurs, la dimension socio-économique doit être prise en considération dans l'étude des étiages dans la mesure où ils peuvent devenir un risque dès lors que la société n'est plus en capacité de répondre aux besoins en eau ; L'estimation des débits d'étiage est donc indispensable pour la planification des usages (Mandal et Cunnane, 2009 ; Pushpalatha, 2013).

1-2-Définition

Dans sa thèse Lang (2006) a étudié les étiages des cours d'eau de l'Est de la France. L'auteur qui a définie d'une manière approfondie le concept d'étiage confirme que si les crues

constituent des épisodes clairement définis, les étiages sont des phénomènes plus complexes à décrire et leur genèse particulièrement longue les rend difficiles à identifier.

La bibliographie montre que les définitions de l'étiage sont nombreuses, vagues et parfois imprécises. Le "dictionnaire français d'hydrologie" (2003) définit l'étiage (low water) comme un «débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières habituelles, même s'il en est l'exacerbation». Le "glossaire international d'hydrologie" (1992) décrit l'étiage comme le "plus bas niveau atteint par un cours d'eau ou un lac", sans précision temporelle, alors que le "dictionnaire français d'hydrologie" de surface (Roche, 1986) inscrit cet événement dans un contexte annuel : « niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné ». Des auteurs ont également liés l'étiage avec la sécheresse (Abi-Zeid & Bobée, 1999 ; George & Vereger, 2000) et soulignent qu'un étiage peut être la conséquence d'une sécheresse hydrologique, mais à l'inverse de celle-ci, il n'est généralement pas considéré comme un événement exceptionnel.

2-Définitions statistiques des débits d'étiages

La littérature fait part de plusieurs variables pour caractériser les étiages en fonction de l'objectif de l'étude ou de l'existence d'un cadre législatif à des fins de gestion.

Les variables les plus couramment citées pour caractériser ou exprimer l'étiage sont les suivantes:

Q.M.N.A : débit mensuel minimal annuel.

V.C.Nd : volume moyen minimums de l'année pendant « d » jours consécutifs.

Q.C.Nd : débit seuil minimum de l'année pendant « d » jours consécutifs.

D.C.E : débit caractéristique d'étiage qui correspond au débit égalé ou non dépassé pendant 10 jours dans l'année consécutif ou non.

L'étiage absolu : débit minimum connu de la période ; Il se fonde sur tous les débits moyens journaliers disponibles.

L'étiage annuel : débit minimum de l'année (hydrologique ou civile).

La connaissance des débits d'étiage potentiels est fort utile pour évaluer un débit à soutirer, pour maintenir un débit minimal ou pour estimer les charges de contaminants qui peuvent être déversées sans compromettre la protection du milieu aquatique et des usages qui y sont liés (prélèvements, vie aquatique, etc.).

Ces variables dépendent de la qualité et de la précision des données hydrométriques. A cet égard soulignons que les données hydrométriques dont nous disposons ne sont guère précises car exprimées au m³ près, ce qui limite la portée des résultats suivants.

3- Caractéristiques des étiages du Haut Sebou

Malgré l'arsenal juridique que constitue la loi sur l'eau 10-95 ; le Maroc, contrairement à la France, ne possède pas de textes législatifs relatifs aux débits d'étiage qui seraient intéressants dans le cadre de la protection des eaux. En France par exemple, dans le cadre de la loi sur l'eau de 1992, le calcul des dispositifs de rejets et de prélèvements en rivière se fait à partir d'un débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans (Lang, 2006). En revanche (Pyrce 2004 ; Hortness, 2006) soulignent qu'aux Etats unis et au Canada la variable d'étiage de référence la plus utilisée est le VCN7 et 3.

Dans ce travail, l'analyse statistique des débits d'étiages du Haut Sebou porte sur des valeurs de QMNA et de VCNd. Ces valeurs, faciles à extraire des « annuaires hydrologiques », renvoient à deux approches de l'étiage. Le QMNA est une valeur statique sur un pas de temps long alors que le VCN, basé sur les valeurs de Qmj, est une approche modélisatrice fondée sur des moyennes mobiles à pas de temps variables qui inclue donc une dimension dynamique : la durée de l'étiage.

Les étiages sur le Haut Sebou sont étudiés à partir des débits aux stations d'Azzaba et de Pont de Mdez. Le choix de ces deux stations est justifié par les longues chroniques qu'elles possèdent et la qualité des valeurs par rapport aux autres stations.

3-1- Les QMNA : l'étiage au pas de temps mensuel

Dans le bassin du Haut Sebou les étiages se produisent le plus souvent en août et septembre comme pour la plupart des cours d'eau des bassins au Maroc. Ceci est le résultat du climat local dominant.

Compte tenu de la non stationnarité des débits déjà évoqué, les débits d'étiage sont également analysés en fonction des périodes sèches et humides (annexe 5.4) Le graphique du CUSUM

montre que les fluctuations des QMNA ne diffèrent pas de la variabilité des modules annuels de la chronique étudiée au niveau des tendances sèches ou humides.

Le découpage de la chronique en séquences d'années sèches et humides permet d'identifier trois séquences à la station d'Azzaba, deux sont humides (1958-1980 et 2008-2009) et l'autre sèches (1981 – 2008). En revanche, le découpage de la chronique à la station de Mdez permet d'identifier quatre séquences, deux sont humides et deux sèches (fig.5.5, tab.5.6).

Figure 5. 5: variabilité des QMNA du Haut Sebou à Azzaba et Pont de Mdez

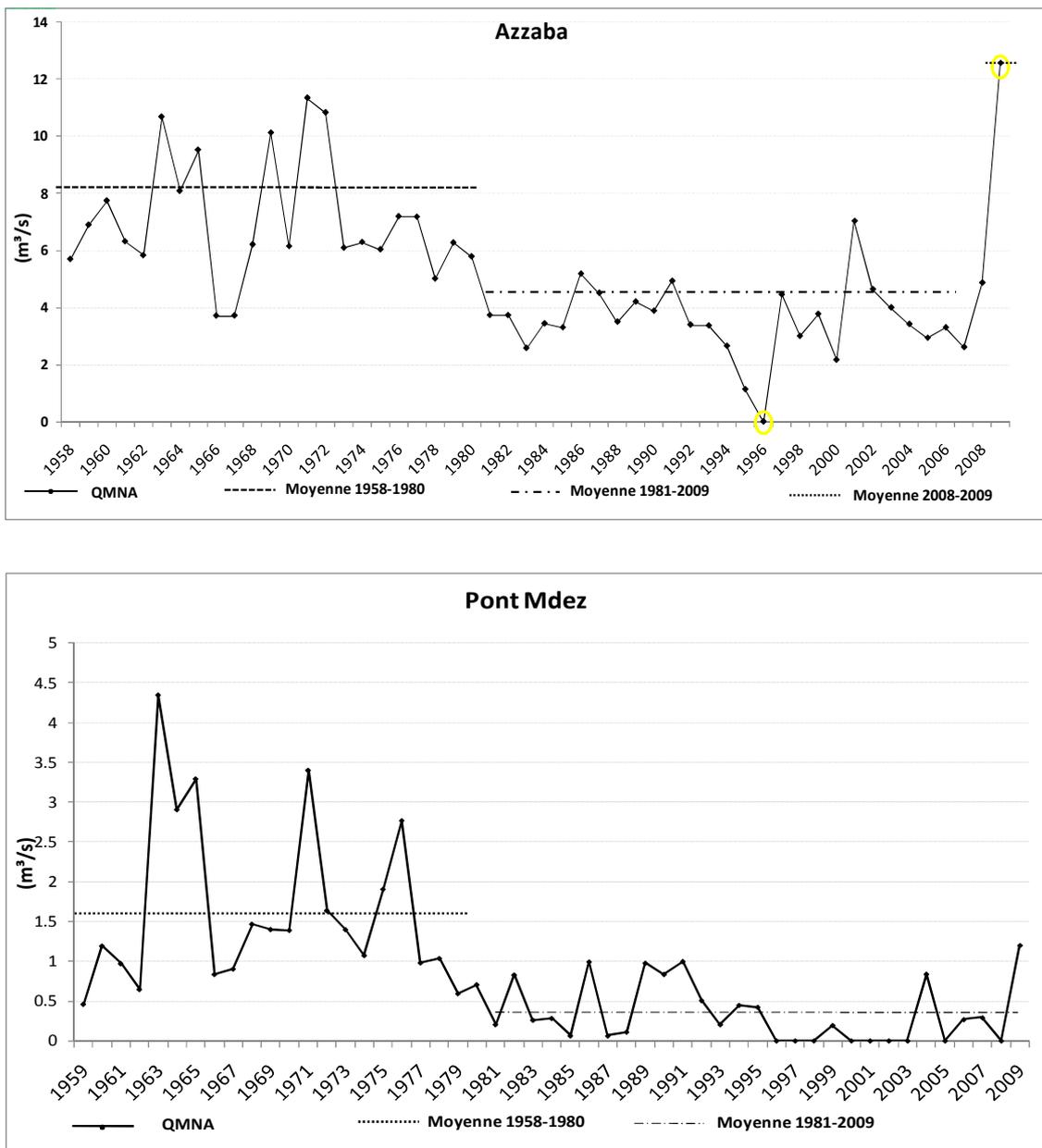


Tableau 5.6 : Découpage de la chronique des QMNA d'Azzaba (1958-2009) et Pont Mdez (1959-2009)

	Sous périodes	moyenne	Ecart - Type	Nombre d'année
Azzaba	1958 -1980	8,07	2,13	23
	1981-2008	4,56	1,30	27
	2008-2009	13,60	-	1
Pont Mdez	1959-1962	1,82	0,33	4
	1963-1965	4,50	0,72	3
	1966-1978	2,55	0,76	13
	1979-2009	1,36	0,37	31

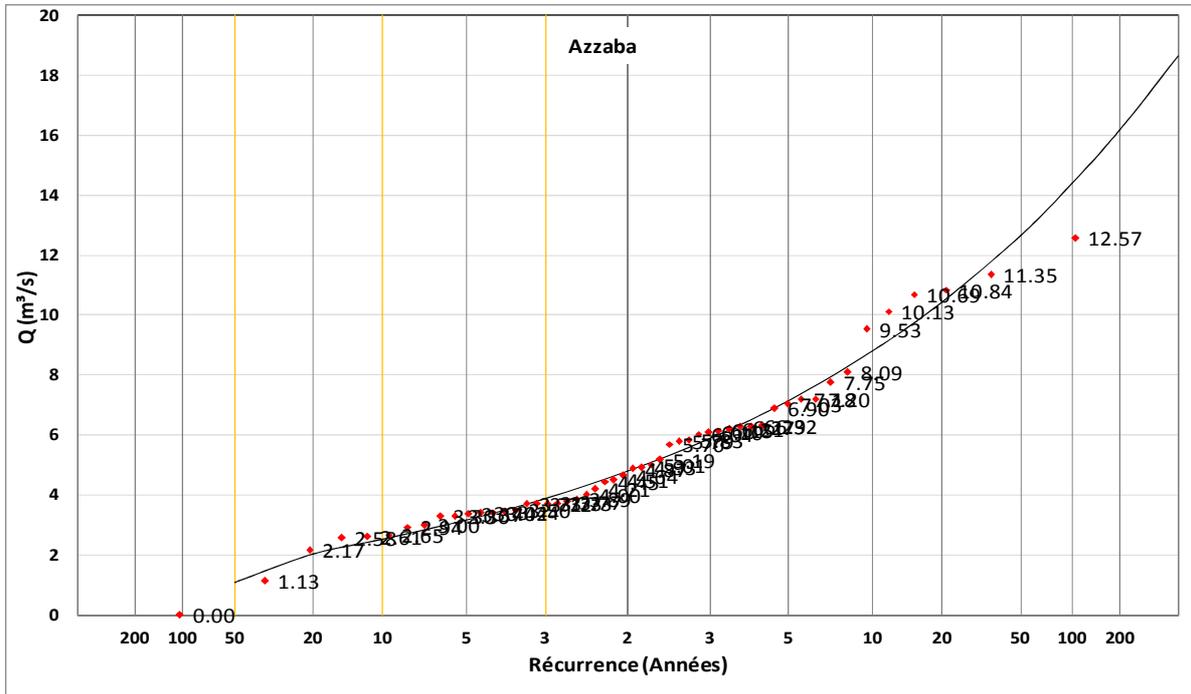
Pour la station d'Azzaba on note une période humide d'une moyenne de 8.07 m³/s. De 1981 à 2008 on bascule vers une nouvelle succession d'années sèches dont la moyenne est 4.56 m³/s, Cette dernière est considéré la plus longue au niveau temporelle (27/52ans). L'année 2008 est systématiquement caractérisée par le déclenchement d'une séquence humide en profitant des apports climatiques importants. En revanche, le découpage de la chronique à la station de Mdez permet d'identifier quatre séquences dont deux sont humides et les autres sont sèches. Les deux sous périodes humides présentent sont homogènes (0,72 ; 0.76), cependant les deux périodes sèches sont moins homogènes (0.33 ; 0.37) La séquence 1979-2009 (31 ans) ; (1,36 m³/s) montre la sévérité d'étiage qu'a connu le Haut Sebou.

3-1-1- Analyse fréquentielle des débits d'étiages (QMNA)

a- Ajustement des QMNA

El Ghachi (2007) indique que l'analyse fréquentielle des QMNA a pour intérêt de quantifier le caractère plus ou moins exceptionnel d'un étiage. Tallaksen et al., (2004) signalent que plusieurs lois statistiques peuvent être utilisées pour l'ajustement des QMNA : Gauss, Frecher, Gumbel, Weibul, Pearson, GEV, Pareto.... Le problème qui se pose ici est la possibilité d'utiliser ces lois pour l'ajustement de séries contenant des valeurs nulles comme le cas des QMNA des stations du Haut Sebou. Pour cette raison, nous avons appliqué des lois avec troncature (Galton, Pearson et Goodrich) qui s'adaptent bien aux séries possédant des débits nuls. L'ajustement des QMNA de la station d'Azzaba à la loi Galton sur la période 1957-2010 semble satisfaisant (fig.5.6).

Figure 5.6 : Ajustements des QMNA à un échantillon de valeurs annuelles avec troncature = 0 (Azzaba ; 1957-2010)



Pour la station d’Azzaba, l’été de 1996, le minimum absolu de toute la série d’observation, a un temps de retour de l’ordre du centennal. Ce constat a été confirmé par les usagers d’eau et les riverains lors des sorties sur le terrain.

Figure 5.7 : Ajustement statistique des débits d’été à la station d’Azzaba

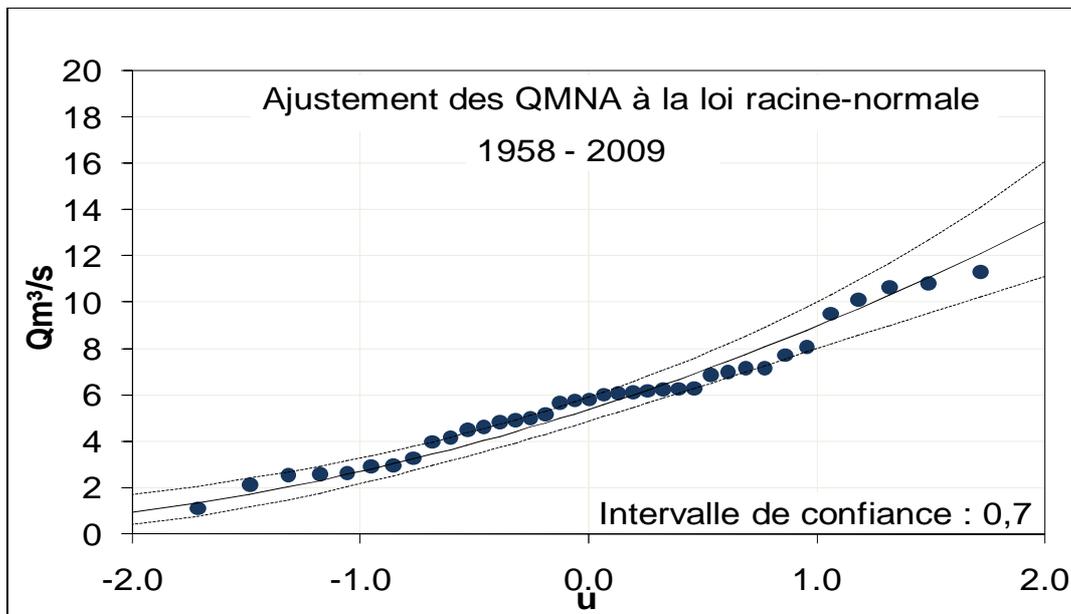
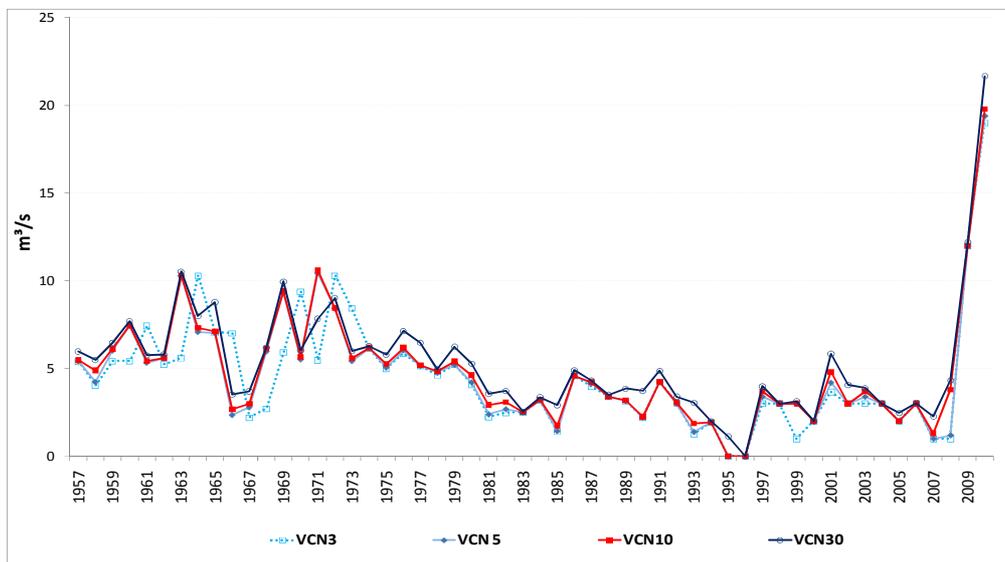


Tableau 5.7 : Débits d'étiage fréquentiels aux stations à Azzaba

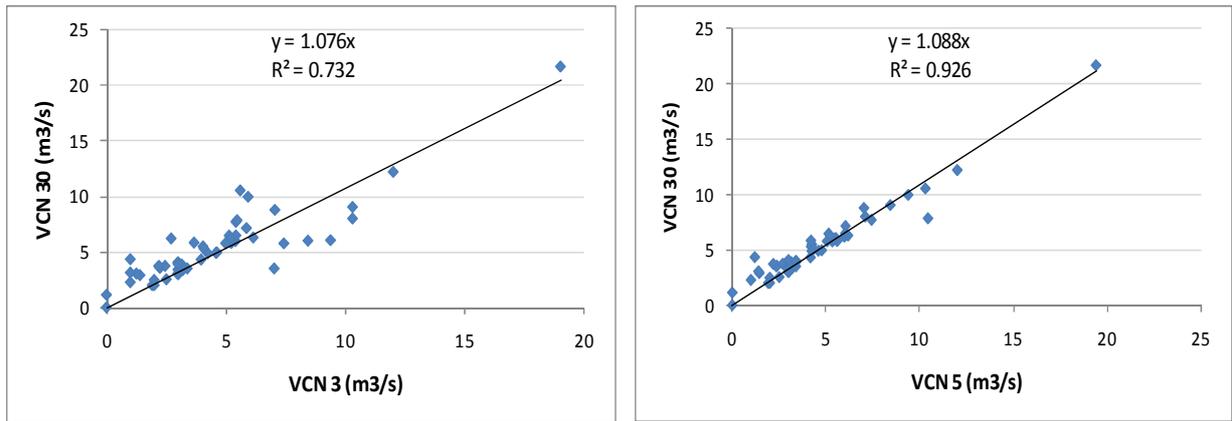
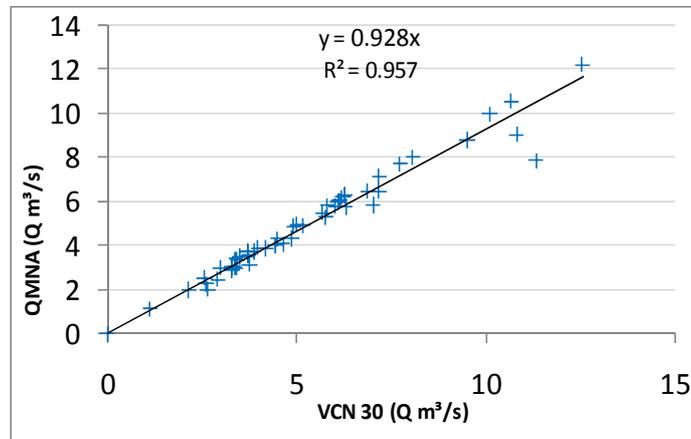
durée de retour	1958-2009 : Q en m ³ /s	1958- 1980 : Q en m ³ /s	1980 – 2008 : Q en m ³ /s
100	0.57	2.22	0.77
50	1.10	2.69	0.94
20	2.02	3.48	1.16
10	2.52	4.25	1.85
5	3.18	5.235	2.49
2	4.79	7.16	3.61
5	7.15	9.03	4.67
10	8.80	9.97	5.20
20	10.445	10.72	5.62
50	12.66	11.54	6.08
100	14.39	12.07	6.39

3-2- Les VCNd : l'étiage au pas de temps journalier

Lang (2006) considère que l'étude des étiages à l'échelle mensuelle pouvait masquer des situations d'étiage très sévères. Nous abordons donc également l'étiage au pas de temps journalier à partir des VCNd (moyenne des "d" débits moyens journaliers consécutifs les plus bas de chaque année). Il s'agit d'une variable obtenue à partir des débits moyens journaliers sur plusieurs jours consécutifs : les valeurs de VCN pour d=3, 10 et 30 ont été retenues à la station d'Azzaba (fig.5.8).

Figure 5.8: Variations des VCN selon les variables retenues

Globalement on note peu de différence entre les VCN aux différents pas de temps. Par exemple les valeurs de VCN 30 sont supérieures de l'ordre de 8% par rapport aux VCN 3 et 5 (fig.5.9). Ceci tient à la grande stabilité des périodes d'étiage mais peut être également accentué par le manque de précision des valeurs de débit. Soulignons également des valeurs comparables entre les VCN 30 et les QMNA (fig.5.10).

Figure 5.9 : Corrélation entre les VCN (Azzaba)**Figure 5.10: Corrélation entre les VCN 30 et les QMNA (Azzaba)**

Pour conclure, le Haut Sebou est marqué par une grande stabilité des débits en période d'étiage qui permettrait d'aborder les débits de référence d'étiage d'un point de vue légal à partir des QMNA.

Nous avons néanmoins calculé les débits fréquents d'étiage les plus extrêmes soit en VCN 3, 5 et 10 (tab.5.8).

Tableau 5.8 : VCN fréquents du Haut Sebou à la station d'Azzaba (lois de Goodrich avec tronçures)

Azzaba	Débits d'étiage							
	F 1/2		F 1/5		F 1/10		F 1/50	
	m3/s	l/s/km²	m3/s	l/s/km²	m3/s	l/s/km²	m3/s	l/s/km²
VCN3	3.82	0.82	1.74	0.37	1.30	0.28	0.32	0.07
VCN5	3.67	0.78	1.51	0.32	0.84	0.18	0.23	0.05
VCN10	3.66	0.78	1.44	0.31	0.97	0.21	0.22	0.05
VCN30	4.42	0.95	2.16	0.46	1.39	0.30	0.56	0.12

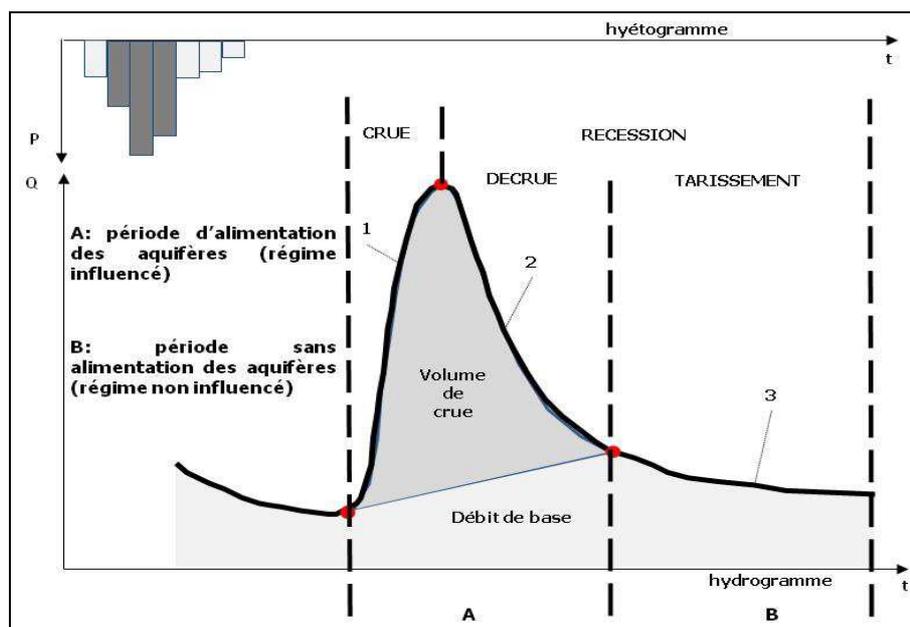
Après la connaissance des valeurs statistiques caractéristiques de l'étiage, il s'avère important de mettre en évidence la dynamique ou processus qui y conduit. La partie suivante s'intéresse à la caractérisation du tarissement ou vidange de l'aquifère.

4-Tarissement des débits des cours d'eau

Le tarissement des cours d'eau constitue le processus principal durant les étiages (Lang, 2006). En effet, dans un régime hydrologique le tarissement désigne « la phase d'écoulement d'un cours d'eau ou d'une source correspondant à la décroissance régulière du débit en l'absence de tout apport météorique et d'intervention humaine » (Dacharry, 1997). Cette définition présente donc le tarissement comme la décroissance des débits d'un cours d'eau en période non influencée par les pluies (Fig.5.11). Par conséquent, la décroissance des débits est le fruit de l'absence d'apports en parallèle de prélèvements continus, notamment par évaporation plus ou moins importante selon les régions. Les débits mesurés lors de ces périodes sont théoriquement associés à la vidange des aquifères comme le souligne Roche (1963) et Hall (1968). Cependant, les processus de tarissement se déroulent à des vitesses différentes dans le temps et l'espace, et ne sont pas facilement quantifiables (Tallaksen, 1995). Différentes lois mathématiques proposent le calcul d'un coefficient de tarissement, à partir du rythme de décroissance des débits. (Lang & Gille 2006).

Dans le Haut Sebou, le tarissement ne représente pas forcément le rythme de vidange de l'aquifère à cause de la forte pression humaine sur les ressources en eau.

Figure 5.11: Identification de la phase de tarissement d'un cours d'eau



4-1-L'extraction des épisodes de tarissement

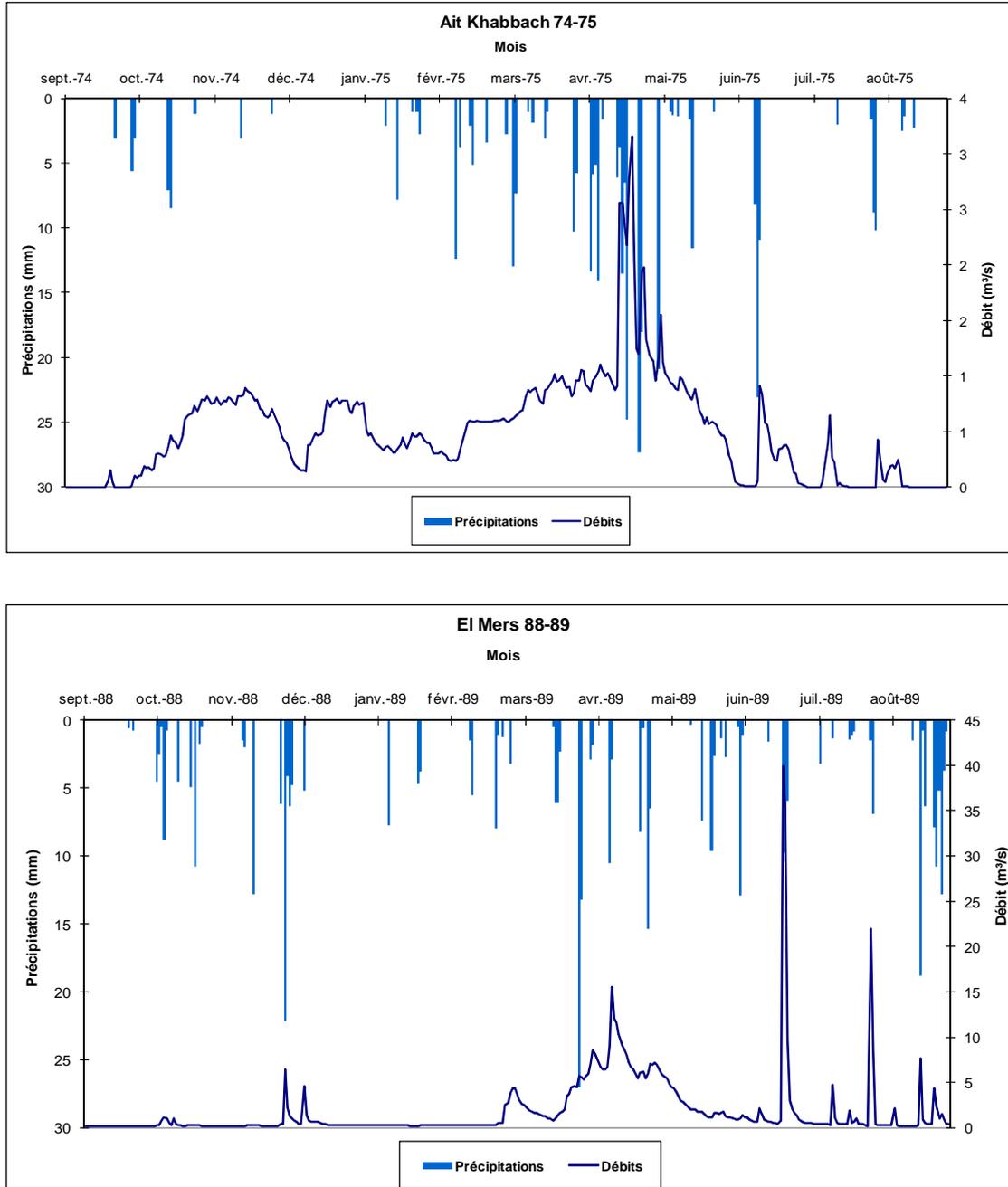
Le débit de base caractérise la phase hydrologique résultant d'une absence de précipitations pendant un laps de temps suffisant pour que le ruissellement et le ressuyage aient cessé. Dans ce cas le débit de base, qui provient uniquement du déstockage des nappes aquifères, permet d'inférer les réserves en eaux souterraines du bassin versant. En effet, les phases de tarissement sont des événements courts qui varient l'un par rapport à l'autre en fonction des variations physiques (Moore, 1997 in Lebaud, 2000). L'analyse des épisodes de tarissement permet d'appréhender l'apport provenant des nappes et le rythme de vidange des réservoirs souterrains (Brodie & Hostetler, 2005).

Donc le premier point à maîtriser est la sélection des débits de base à partir de la série de débits moyens journaliers (Q_{mj}). De nombreuses méthodes existent, qu'elles soient automatisées ou manuelles. Les premières ont comme inconvénient la perte de contrôle des résultats, car souvent un seul paramètre est utilisé pour extraire les débits de base ; On peut notamment citer à cet égard l'exemple des filtres récursifs (Nathan, 1990). Les secondes offrent la possibilité d'un contrôle plus fin des seuils et limites afin de sélectionner au plus juste les débits répondant à la définition du débit de base. En partant de ces considérations le choix a été fait de contrôler chaque phase de tarissement en contrôlant manuellement le débit initial Q_0 . L'extraction des débits de base s'est faite à partir de la méthodologie suivante :

Dans un premier temps nous avons mené une discrimination par l'amont, à partir des hyétogrammes, pour déterminer les périodes non influencée par les précipitations (fig.5.12). Pour cela nous avons mis en regard les Q_{mj} aux stations avec les pluies des stations météo pour lesquelles nous disposons de données. Afin d'écartier les débits susceptibles d'être influencés par de l'eau de ressuyage nous avons introduit un délai entre la fin de la pluie significative et la sélection de Q_0 ; Dans la littérature plusieurs formulation empirique existe pour définir la durée de ressuyage, nous avons fait le choix de celle de Mau et Winter (1997) qui fixe le délai (T) en fonction de la surface A du bassin versant comme : $T = A^{0.2}$; Où T est la durée de ressuyage en jours et A la surface du bassin versant en km^2 . Appliqué au bassin du Haut Sebou à Azzaba la durée de ressuyage est de 5 jours. Néanmoins les valeurs pour Q_0 obtenues en appliquant systématiquement ce seuil se sont révélées beaucoup trop fortes. Nous nous sommes donc orientés vers un critère statistique de détection de Q_0 . Nous avons pour

cela appliqué la méthode de séparation des écoulements proposée par Gamez et Zumstein (1993).

Figure 5.12 : Exemple d'hydrogramme et hyétogramme pour la station d'Ait Khabbach pour l'année 1974-1975 et celle d'El Mers pour l'année 1988-1989.

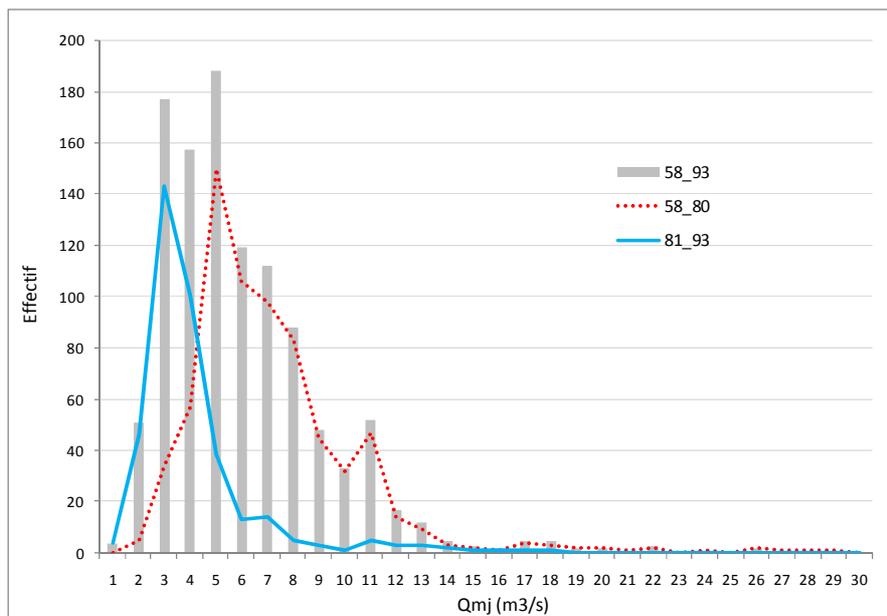


Cette méthode permet de scinder une chronique de Q_{mj} en débit de surface et de base. De plus elle permet de fixer un débit de base mensuel réel et maximum théorique probable ce qui est intéressant pour la problématique qui nous intéresse ici (précipitation/ressource en eau). Cette méthode, présuppose que « la dualité de comportement des écoulements d'années consécutives se retrouve sur les courbes de débits moyens journaliers classés à l'échelle du

mois ». Dans le cas d'une chronique statistiquement représentative du régime hydrologique analysé, les hauts débits sont de l'écoulement de crue et les bas débits de l'écoulement de base ; Tout l'enjeu est de trouver la limite entre ces deux types d'écoulement (signification du mode dans cette méthode).

Les auteurs considèrent que le mode de la distribution des Q_{mj} classés par mois représente cette limite. Nous n'avons travaillé que sur la période 1958-1993 compte tenu de la dégradation de la précision des débits à partir de 1994 (précision au m^3/s près). La distribution bimodale des Q_{mj} pour les mois de septembre rend bien compte de l'impact du niveau de la pluviométrie annuelle sur les volumes d'eau souterrain disponibles dans le bassin versant. En effet chacun des modes graphiques correspond au mode de la série humide et de la série sèche (fig.5.13).

Figure 5.13 : Distribution des Q_{mj} pour le mois de septembre de la période 1958-1994 à la station d'Azzaba



Modes Fréchet calculés : $6,04 m^3/s$ pour 1958/1980 et $3,47 m^3/s$ pour 1980/1993

Compte tenu d'une distribution dissymétrique des Q_{mj} (fig.5.14) les auteurs calculent le mode à partir d'une loi de Fréchet (loi de Gumbel à laquelle on substitue les Q à $\text{Log } Q$,

suivant :

$$\text{Log}(Q_j) = \log(Q_{j_0}) - \frac{1}{K} \cdot \text{Log}[-\log(F)]$$

avec :

$$\text{Log}(Q_{j_0}) = \text{mode} = \overline{\text{Log}(Q_j)} - 0,45 \cdot S[\text{Log}(Q_j)]$$

$$\frac{1}{K} = \text{gradex de Fréchet} = 0,78.S[\text{Log}(Q_j)]$$

$S[\text{Log}(Q_j)]$ = écart type de la distribution des logarithmes naturels des débits

$\overline{\text{Log}(Q_j)}$ = moyenne des logarithmes naturels des débits

Du point de vue pratique pour chaque mois on dresse des courbes log-log, en portant :

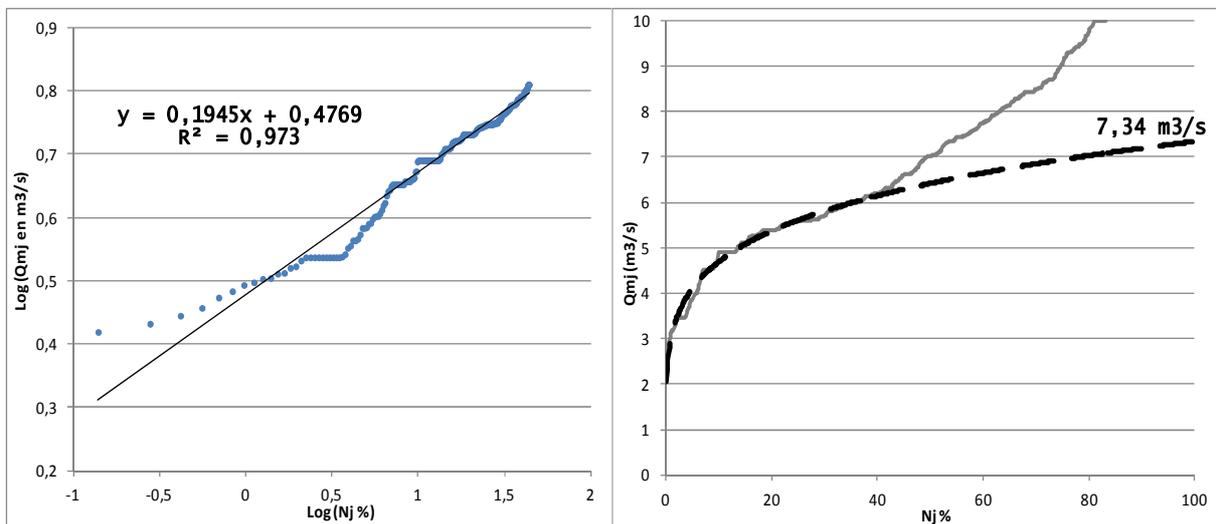
- en abscisse, les pourcentages cumulés des nombres de valeurs par classe : $N_j\% = 100n/N$

avec n = valeurs cumulées classées

N = nombre total de valeurs de la série étudiée

- en ordonnée, les valeurs des débits situés en deca du mode s'alignent, caractérisant ainsi une courbe de vidange mensuelle. Le mode peut être déterminé à partir d'une loi de Gumbel ou de Fréchet.

Figure 5.14 : Courbe LogQmj/LogNj% pour les Qmj des mois de septembre de la période 1958-1980 à la station d'Azzaba



Afin d'ajuster au mieux le débit initial de chaque phase de tarissement la méthode a été appliquée sur les débits pour la période humide et la période sèche. Globalement le rapport entre le débit initial de la phase de tarissement, correspondant au mode Fréchet des distributions des Qmj classés par mois, de chaque période est compris entre 2 pour octobre et 3.5 pour juillet (tab.5.9 et fig.5.16).

Tableau 5.9 : Valeurs du mode Fréchet pour toute la chronique et les séries humide et sèche

Période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1958 - 2008	8.999	11.11	15.44	16.62	13.2	8.74	5.69	4.11	3.84	4.48	5.16	6.92
1958-80 S. humide	14.46	18.77	26.49	28.58	21.62	14.62	14.46	6.63	6.04	6.86	8.03	10.28
1981-08 S. sèche	6.43	7.39	10.59	12.48	9.33	6.28	4.17	2.92	2.74	3.48	3.76	5.13
Rapport s.s et s.h.	2.3	2.5	2.5	2.2	2.3	2.3	3.5	2.3	2.2	2.0	2.1	2.0

Cette méthode nous permet d'obtenir le régime des nappes souterraines et également les valeurs maximales du débit mensuel de base. Il a été calculé sur les 2 périodes sèches et humides (fig.5.15).

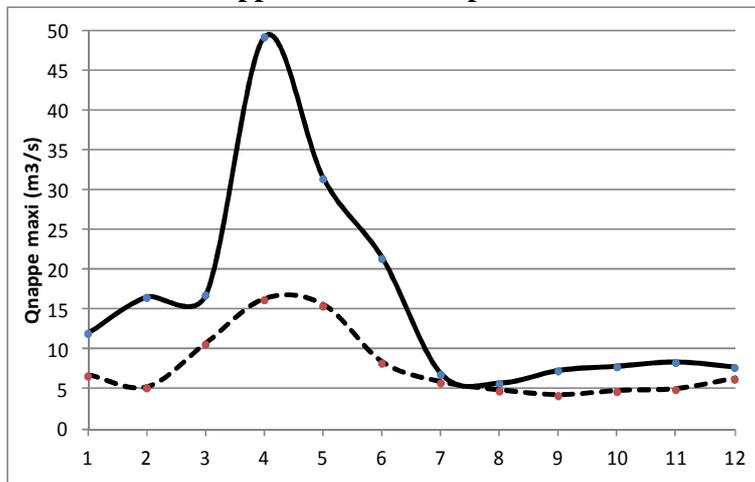
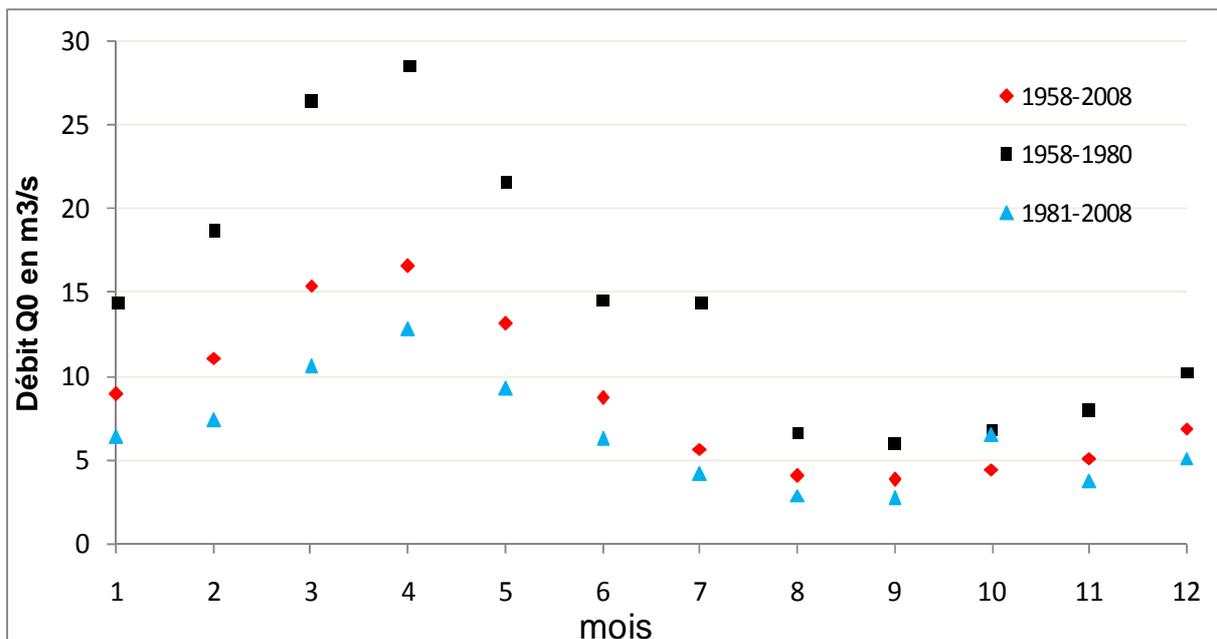
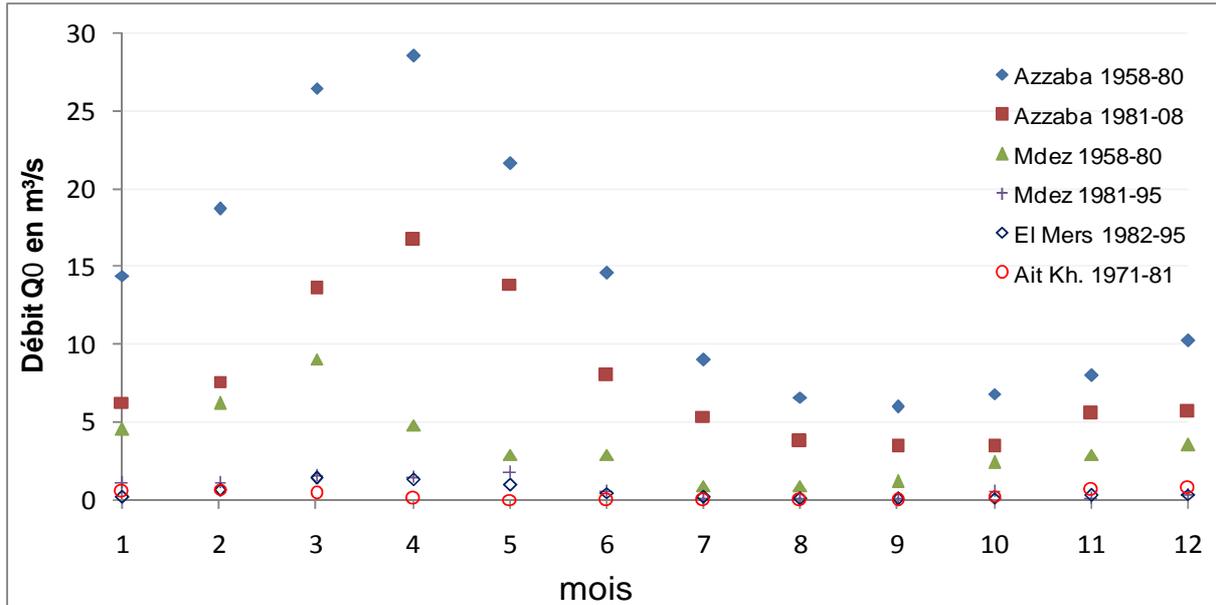
Figure 5.15 : Valeurs du débit de nappe maximum d'après la méthode « Gamez- Zumstein »**Figure 5.16 : Le débit Q0 maximum d'après le mode Fréchet à Azzaba.**

Figure 5.17 : Le débit Q0 maximum d'après le mode Fréchet pour les stations du bassin**Tableau 5.10 : Le débit Q0 maximum d'après le mode Fréchet pour toutes les stations.**

	Période	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Azzaba	1958-80	14.46	18.77	26.49	28.58	21.62	14.62	9.03	6.63	6.04	6.86	8.03	10.28
	1981-08	6.28	7.63	13.62	16.71	13.88	8.05	5.39	3.81	3.47	3.48	5.60	5.66
Mdez	1958-80	4.58	6.22	9.07	4.84	2.96	2.96	0.94	0.93	1.24	2.43	2.96	3.53
	1981-95	1.1	1.1	1.54	1.47	1.78	0.52	0.12	0.07	0.07	0.52	0.08	0.3
El Mers	1982-95	0.24	0.64	1.42	1.34	0.97	0.5	0.22	0.13	0.1	0.14	0.31	0.39
Ait Kh.	1971-81	0.55	0.71	0.46	0.12	0.04	0.02	0.009	0.003	0.01	0.27	0.65	0.75

La comparaison des valeurs de Q0 trouvés par le mode Fréchet et par la durée de 5 jours montre très clairement que cette dernière méthode n'est pas suffisante pour détecter le débit initial d'une phase de tarissement sur le bassin du Haut Sebou ainsi que sur ses sous bassins. Par exemple le débit initial Q0 maximum est 3 fois plus fort par la « méthode de la durée » que celle du mode Fréchet (tab.5.11).

Tableau 5.11 : Valeurs de Q0 Max d'après les deux méthodes d'extraction des épisodes de tarissements.

Station / m.3.s-1	Azzaba	Pont Mdez	El Mers	Aït Khabach
M. Confrontation	77.700	23.100	8.020	5.84
M. GAZU	28.58	9.07	1.42	0.75

Au final, la détection des phases de tarissement s'est faite à partir de la double condition d'au moins 5 jours sans précipitation sur les stations pluviométriques du bassin et d'un débit inférieur ou égal au mode Fréchet du mois et de la série considérés (tab.5.10). Seules les phases de tarissement supérieures à 5 jours ont été extraites et exploitées.

Tableau 5.12 : Nombre et durée moyenne de phases extraites sur les hydrogrammes

Station	Azzaba	Pont de Mdez	El Mers	Aït Khabach
Nombre de phases	98	76	28	15
Durée moyenne	14.6	7.3	8.1	8.4

4-2-L'exploitation des phases de tarissement

L'analyse du tarissement étudie la fonction $Q=Q(t)$ en régime non directement influencé par les précipitations. Basée sur des équations théoriques qui régissent la circulation de l'eau souterraine, la décroissance des débits des aquifères peut être représentée comme une fonction des caractéristiques de l'aquifère : « le coefficient de tarissement renferme des informations concernant le stockage et les caractéristiques des aquifères » (Tallaksen, 1995). Sous des conditions idéales des propriétés de l'aquifère, « aquifère de Dupuis-Boussinesq », homogène, uniforme, isotrope, avec un écoulement vertical et un effet de capillarité à partir de la surface piézométrique négligeables, Boussinesq (1904) a linéarisé les équations de l'écoulement en milieu poreux. Une équation de « Dupuis-Boussinesq » linéarisée est une simple équation exponentielle :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

Cette équation linéaire, dite « loi de Maillet » exprime la relation entre le débit initial et le débit à un instant t par le coefficient de tarissement α ; Ce coefficient est caractéristique de la vitesse avec laquelle l'eau des nappes souterraines est restituée aux sources. Le coefficient encore appelé coefficient de décroissance du débit, est calculé par transposition des termes de la formule de Maillet, formule relative à l'évolution du débit des sources en régime non influencé, dont les hydrologues ont montré qu'elle était applicable au cas du débit des cours d'eau au cours des phases de tarissement (Gonot, 1999). Ainsi, ce coefficient présente aussi l'avantage d'être comparable d'un bassin versant à l'autre.

Néanmoins cette formulation présente des limites dans son application. En effet les phases de tarissement sont des événements courts qui varient l'un par rapport à l'autre en fonction des variations de facteurs physiques (Moore, 1997): évapotranspiration, inégale distribution des pluies, présence de plusieurs aquifères... Donc l'hétérogénéité lithologique du milieu d'application de cette expression linéaire a comme effet une variabilité temporelle du tarissement. Nous pouvons en faire le constat sur les 4 bassins versants du Haut Sebou pour lesquelles le coefficient de variation de α est compris entre 56% et 94% (tab.5.13).

Tableau 5.13 : Statistiques descriptives des coefficients de Maillet déterminés directement des épisodes de tarissement

Station	Nombre d'épisodes	Durée max. des épisodes en jours	α Min	α Max	α Moy	Coef. de variation
Ait Khabbach	15	14	0.0003	0.0507	0.0140	94%
El Mers	28	21	0.0130	0.2320	0.0626	81%
Pont Mdez	76	30	0.0119	0.1742	0.0582	68%
Azzaba	98	31	0.0039	0.0507	0,0140	56%

On peut assimiler cette variation observée à différents facteurs naturels et méthodologiques. Cependant la variabilité saisonnière joue un rôle important dans cette hétérogénéité des coefficients. Effectivement, une évapotranspiration plus importante durant la saison chaude aurait tendance à accentuer le phénomène de tarissement. Par ailleurs, l'observation des coefficients montre que ceux-ci sont majoritairement plus forts durant les mois chauds, de mai à septembre. Cependant, il arrive que les coefficients les plus forts soient également identifiés durant la saison froide, d'octobre à mars (Annexe.5.13). Au vu de la tendance générale observée, l'évapotranspiration, et donc la température, semble jouer un rôle dans l'importance des tarissements. La variabilité saisonnière paraît donc influencer sur la fréquence et l'importance des tarissements.

La valeur de Q_0 peut être à l'origine de l'hétérogénéité des échantillons comme le soulignent Hingry et al., (2009) en évoquant le rôle de « la distribution spatiale des conditions initiales d'humidité des sols et des niveaux de la nappe, ainsi que la distribution spatiales des précipitations antérieurs » dans la variabilité de α .

Enfin, malgré la double condition imposée pour le choix de Q_0 il n'est pas impossible que des phases soient influencées par « l'effet pluie ».

La forte variabilité des coefficients de tarissement (annexe 5.12) peut donc être expliquée par les points précédemment cités. Néanmoins, même si l'on ne peut dégager une tendance particulière, on peut regrouper les coefficients de saison chaude et ceux de saison froide. De même, la possibilité que les variations interannuelles du volume de précipitations influence le tarissement est à signaler. En effet, comme on a montré précédemment on constate que la période 1960-1980 est classée comme légèrement humide, tandis que la période 1981-1985 est considérée comme d'intense sécheresse. On constate un recul, voir une disparition, des années humides à la fin du siècle dernier. De ce fait, un apport en eau moins important modifie les valeurs de débits et donc des coefficients de tarissement calculés.

L'accentuation progressive de la sécheresse des dernières années a donc pu accentuer les variations des coefficients de tarissement. Au final la forte variabilité des coefficients de tarissement, même si elle trouve son origine, entre autres, dans des facteurs naturels, en limite les aspects applicatifs (connaissances hydrogéologiques, modélisation). C'est la raison pour laquelle les résultats des méthodes aboutissant à une courbe maîtresse de tarissement sont intéressants.

En effet, afin de palier cette variabilité et d'aboutir à un coefficient de tarissement moyen le choix s'est porté sur la construction d'une « courbe maîtresse de tarissement » (Master Recession Curve des auteurs anglophones) pour laquelle l'ensemble des phases de tarissement définies à partir des chroniques de débits moyens journaliers est utilisé simultanément.

4-2-1- Les courbes maîtresses de tarissement (Master Recession Curve)

Afin de réaliser une analyse pertinente du tarissement, la construction de courbes maîtresses de tarissement est effectuée. Une courbe maîtresse de tarissement consiste à caractériser une valeur moyenne d'un α de Maillet par l'ensemble des phases de tarissement. Il existe différentes méthodes pour conceptualiser ces courbes. Les deux méthodes les plus couramment utilisées sont appliquées : la méthode des corrélations et la méthode « Matching Strip Method » (Tallaksen, 2000).

a- La méthode de corrélation

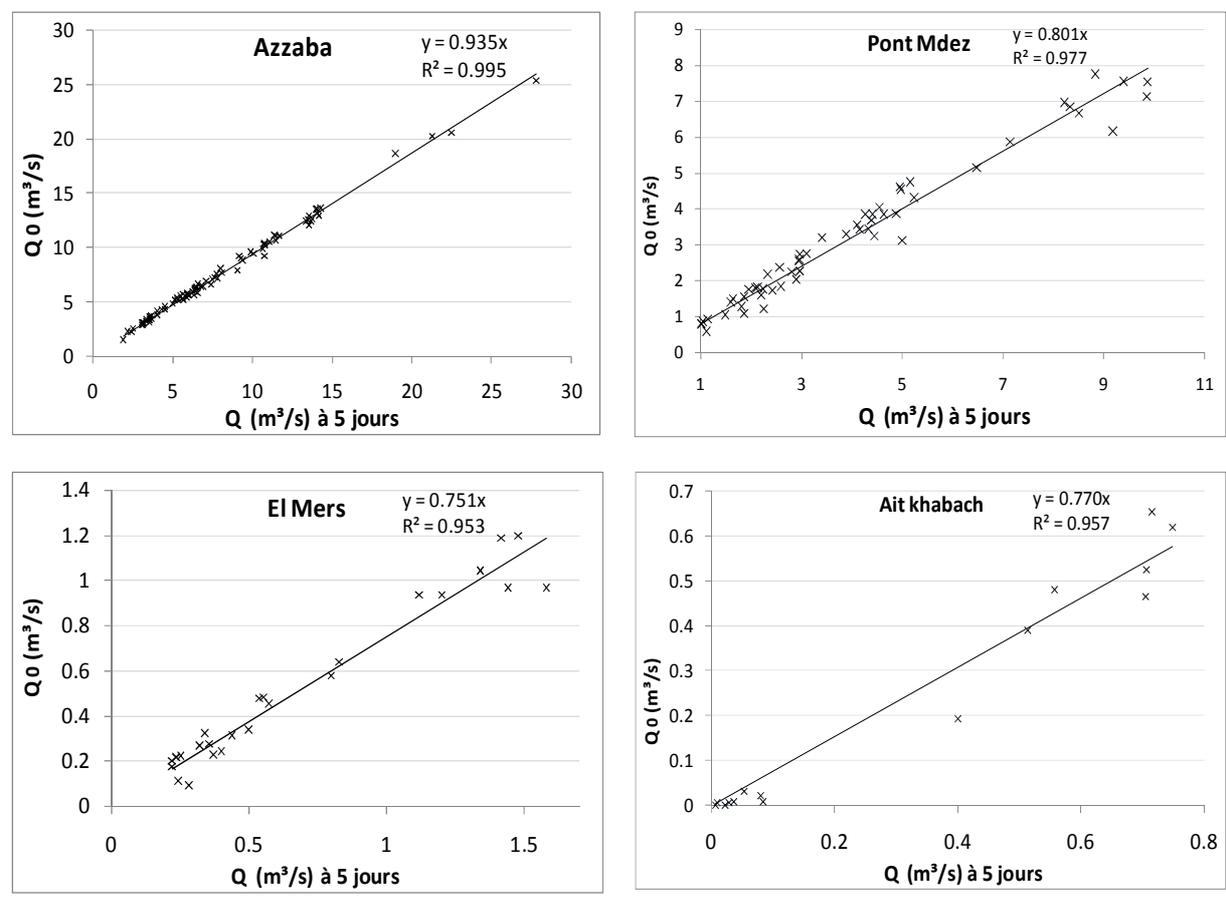
Cette méthode est appliquée, soit pour déterminer la pente moyenne d'un épisode de tarissement particulier, soit pour calculer un rapport α_t en corrélant les débits Q_0 et Q à t jours (Q_t), pour chaque phase observée (Tallaksen et Van Lanen, 2004, in Lang (2007). Le

principe est d'organiser le nuage de points (Q_t , Q_{t+dt}) de manière à dessiner une droite de régressions, dont le coefficient de tarissement α est exprimé par la relation suivante :

$$k = \exp(-\alpha) = \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{1/t}$$

Donc à l'instar des travaux de Lebaud (2000) nous utilisons la méthode des corrélations pour proposer un rapport à 5 jours correspondant à la pente de la droite de régression entre les débits Q_0 et les débits à 5 jours ($Q_{t=5 \text{ jours}}$)

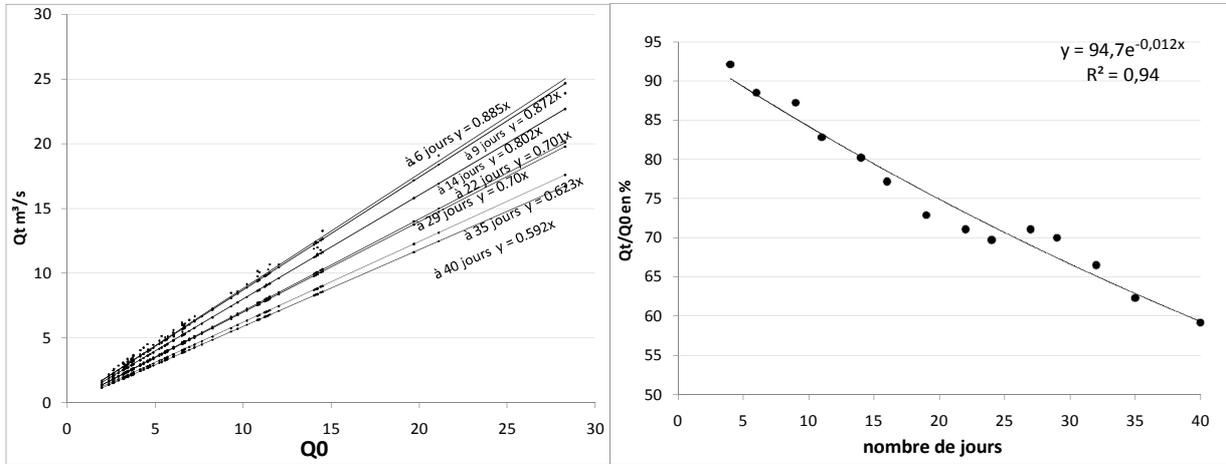
Figure 5.18 : Coefficient de tarissement moyen d'après la méthode de corrélation



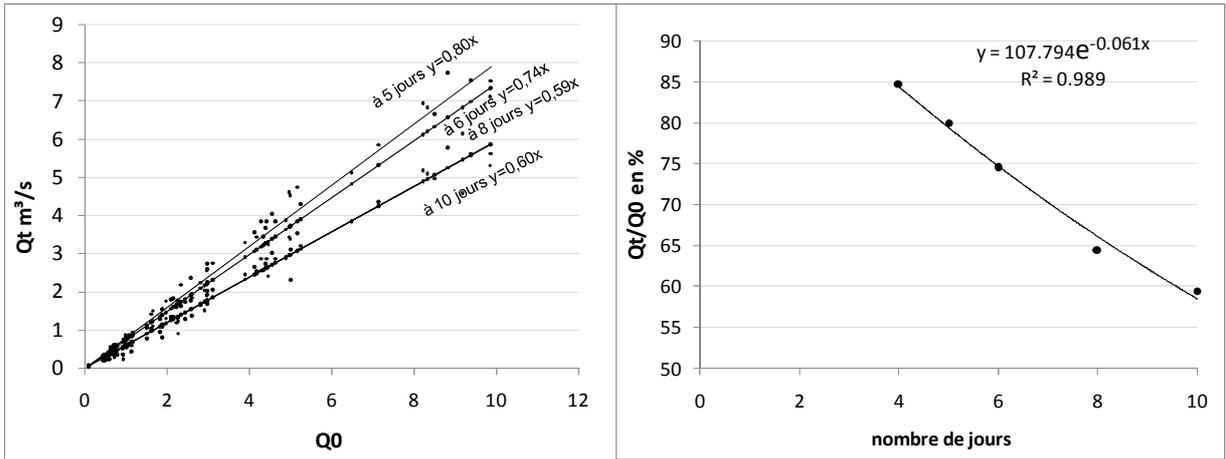
Dans l'exemple d'Ait Khabach à 5 jours, la pente est égale à 0,77. Cela signifie que le débit à 5 jours vaut 77 % de Q_0 . Le R^2 étant égal à 95%, le niveau de précision est donc suffisamment satisfaisant pour que la valeur de la pente soit retenue. On recommence l'ajustement avec des pas de temps entre Q_0 et Q_t croissant.

Figure 5.19 : Ajustement de la courbe à une courbe exponentielle et détermination du coefficient de tarissement de maillet

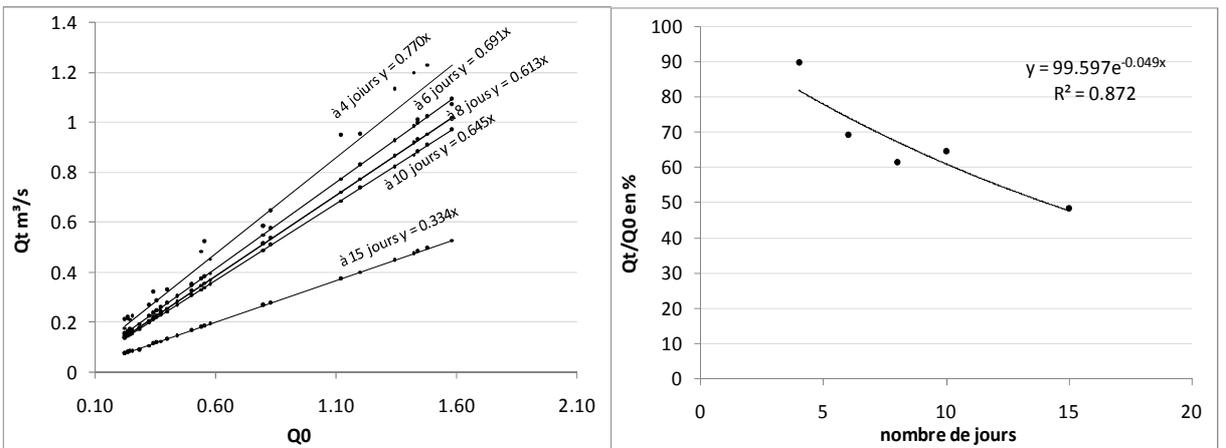
Azzaba



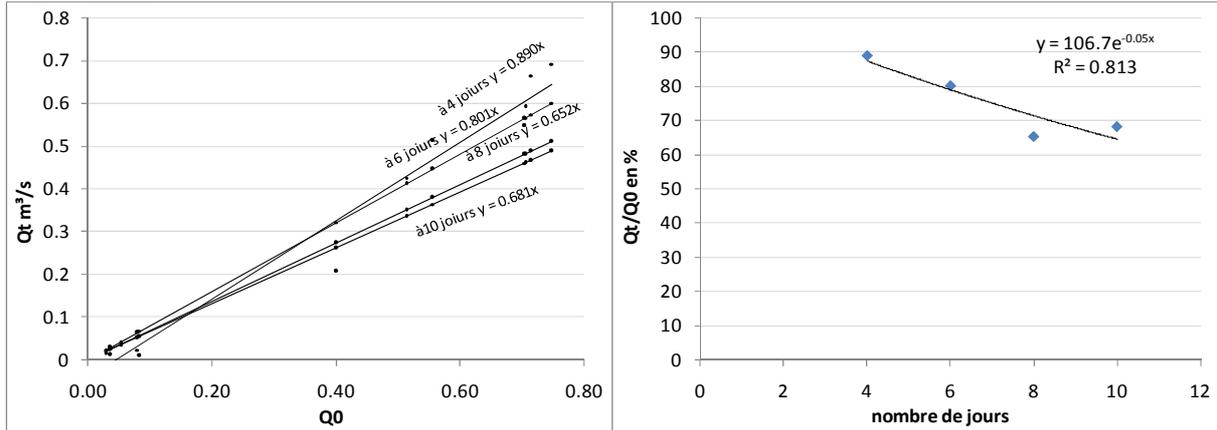
Pont Mdez



El Mers



Aït Khabach

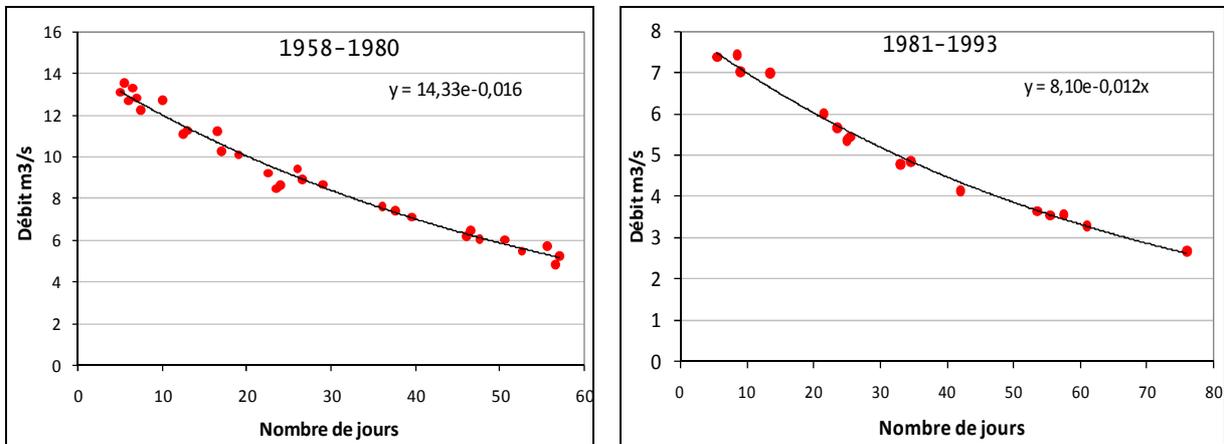


Au final le coefficient de tarissement est obtenu en ajustant une courbe exponentielle dans le nuage de point $Q(t) = Q(t) + dt$.

Tableau 5.14 : Coefficient de tarissement aux 4 stations par la méthode des corrélations

	Azzaba	Pont Mdez	El Mers	Aït Khabach
Coefficient α	0.012	0.061	0.042	0.05

Figure 5.20 : Tarissement pour les deux périodes pluviométriques homogènes à la station d’Azzaba



b- Matching Strip method (M. S. M)

Dans la méthode M.S.M. les débits de la phase de tarissement sont exprimés en $\ln Q$ de manière à former une droite (Lebaut, 2000). La méthode consiste ensuite à juxtaposer tous les épisodes de tarissement jusqu'à ce qu'ils forment une seule droite (Toebe & Strang, 1964).

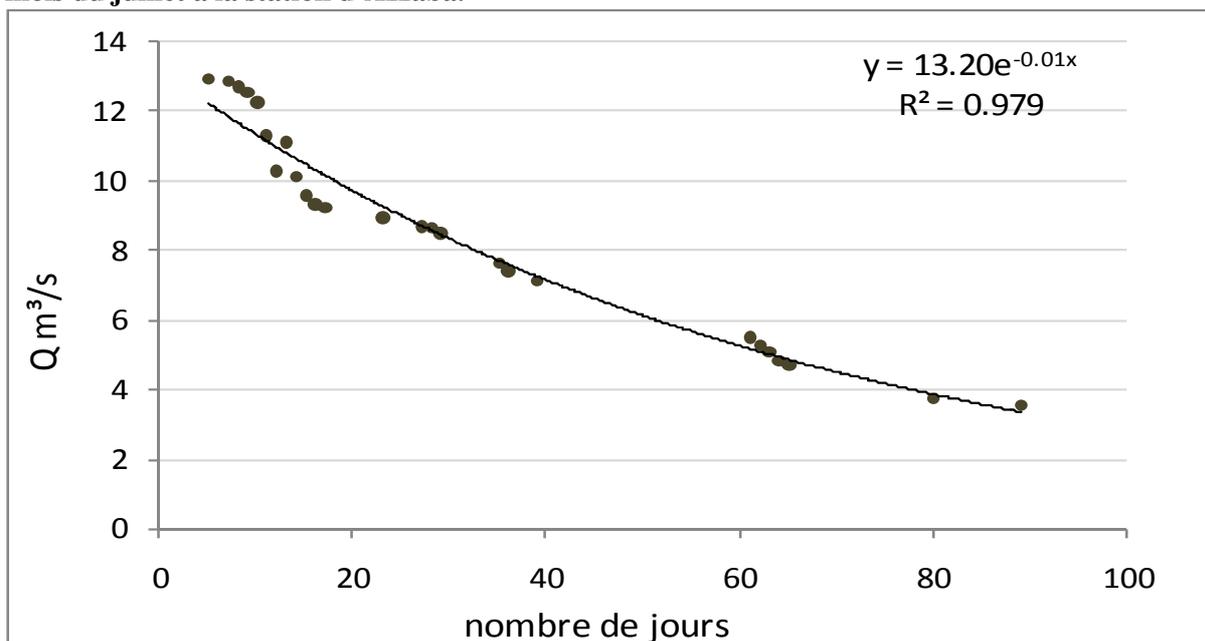
Du point de vue pratique nous prenons la phase de tarissement avec le Q_0 le plus élevé pour commencer la courbe. Le Q_t de cette même phase doit correspondre, ou au moins se rapprocher, avec le Q_0 de la phase suivante et ainsi de suite (Fig.5.21). Les dates et durée des phases ne sont pas des facteurs pris en compte dans cette construction.

Figure 5.21 : Exemple de mise en correspondance des débits Q_0 et Q_t de différentes phases de tarissement pour la station d'Azzaba

9,520	9,454					
9,100	9,330					
8,760	9,320	9,310				
8,540	9,160	8,910	9,080			
8,370	8,930	8,570	8,770	8,980	8,970	
8,210	8,660	8,540	8,750	8,590	8,640	8,680
8,100	8,600	8,090	8,590	8,540	8,470	8,460
		8,040	8,330	8,520	8,320	8,280
			8,170	8,140	8,180	8,090
			7,900	8,100	8,030	7,750
					7,690	

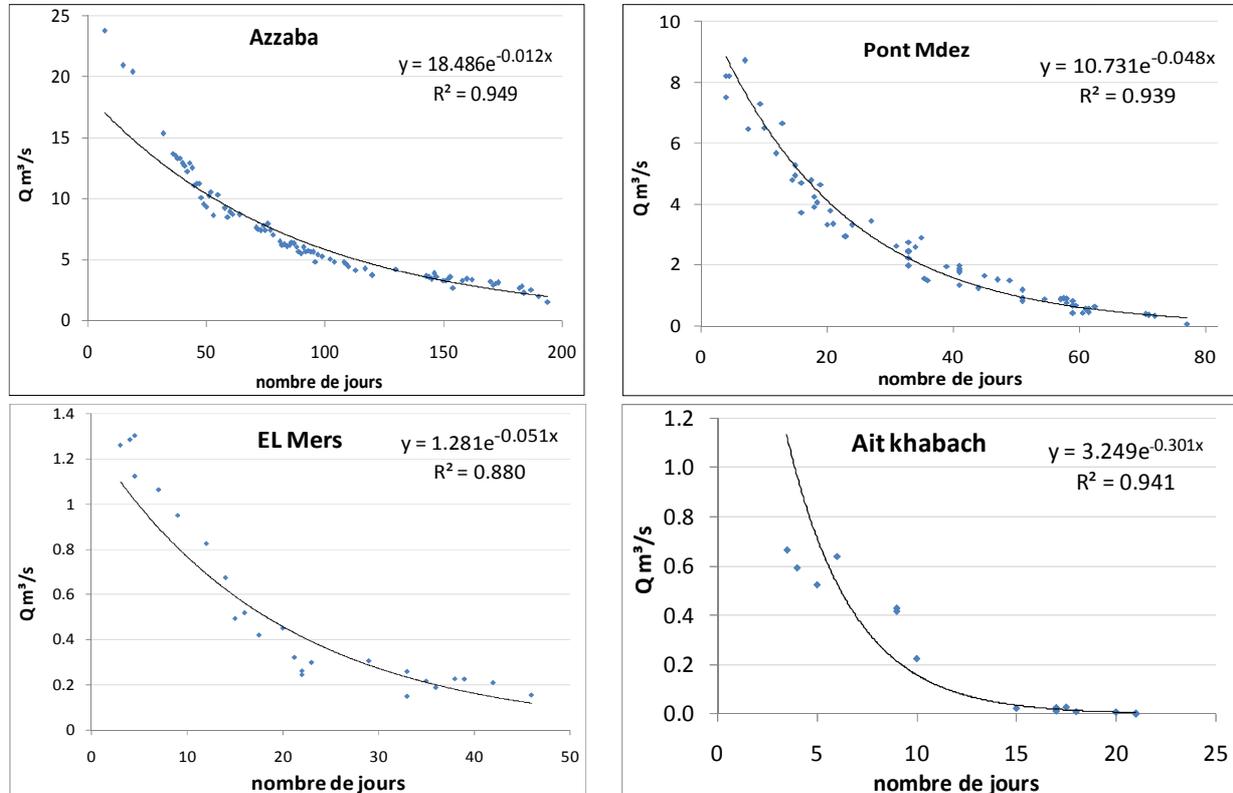
Une fois que la mise en correspondance de toutes les phases de tarissement dont on dispose pour chaque station est contrôlée graphiquement le coefficient α de Maillet est calculé en ajustant une courbe de forme exponentielle à l'ensemble des phases (fig.5.22).

Figure 5.22 : L'exemple du calcul du coefficient de tarissement par la méthode M.S.M. pour le mois du juillet à la station d'Azzaba.



Les coefficients de tarissement ont été calculés pour les 4 stations (fig.5.23, tab.5.15)

Figure 5. 23 : Coefficient de tarissement moyen d'après la méthode de "matching strip".



Soulignons que les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparables (tab.5.13) et sont mêmes identiques pour la station d'Azzaba : la valeur de α est de 12.10^{-3} . Ces coefficients présentent une très grande variabilité selon les bassins et renvoient à leurs conditions lithologiques. Le très fort coefficient α d'Aït Khabach exprime un tarissement très rapide qui est le fait de la très forte perméabilité de l'aquifère des formations basaltiques (cf. 1^{ère} partie). Les coefficients α de l'ordre de 5.10^{-2} des stations d'El Mers et de Pont de Mdez sont conformes à la vidange d'aquifères calcaires. Pour la station d'Azzaba des nuances sont à apporter. A cet égard la méthode M.S.M. présente l'avantage de moins lisser le phénomène de tarissement que la méthode des corrélations et permet donc une meilleure analyse du phénomène. Pour Azzaba l'ajustement de la loi de Maillet au nuage de points est le moins bon puisque il apparaît clairement une rupture de pente au alentour de $10 m^3/s$ (fig.5.23). La partie supérieure répond à un tarissement bien plus rapide que le 12.10^{-3} moyen, il voisine les 48.10^{-3} de celui d'El Mers plus à l'amont. Par contre la partie inférieure présente un coefficient plus faible. Ceci illustre le rôle du complexe sourcier Aïn Timedrine, Ouemender et Sebou au

passage du Sebou dans le causse. Ces trois sources soutiennent très largement les débits du Haut Sebou quelques centaines de mètres à l'amont de la station d'Azzaba. Ce problème d'ajustement illustre également la difficulté d'appliquer un modèle de décroissance linéaire à un système constitué de multiples aquifères.

Tableau 5.15 : Coefficients de tarissement d'après les deux méthodes

Coefficient α	Azzaba	Pont Mdez	El Mers	Aït Khabach
Méthode des corrélations	0.012	0.061	0.042	0.05
M.S.M.	0.012	0.048	0.051	0.301

Ce phénomène est également bien visible sur les séquences de tarissement saisonnier. Pour Azzaba le coefficient α est le plus fort au printemps, 17.10^{-3} , lorsque les aquifères sont, en année moyenne, au maximum de leur remplissage. Ensuite α diminue pour passer à 14.10^{-3} pour l'été et l'automne jusqu'à 10.10^{-3} pour l'hiver, saison durant laquelle ce sont les réserves « ultimes » qui sont restituées au cours d'eau.

Figure 5.24 : Coefficient de tarissement moyen saisonnier d'après la méthode de "matching strip"

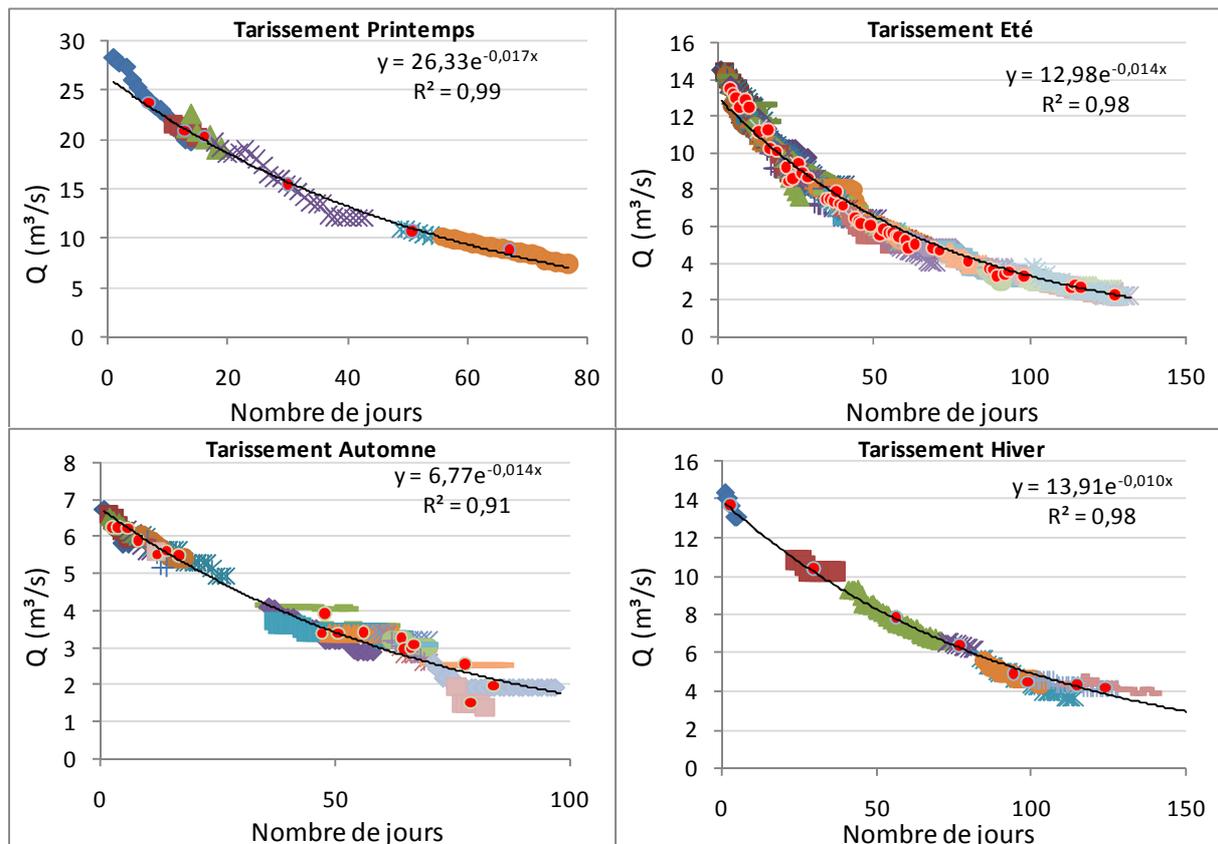
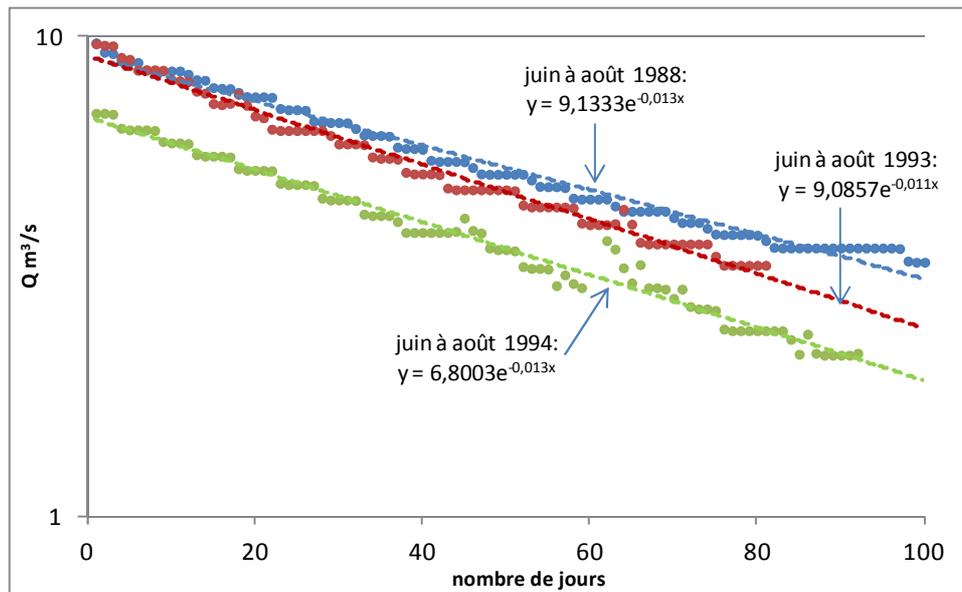


Tableau 5.16 : Equation du tarissement : "matching strip method"

.	Printemps		Eté		Automne		Hiver	
	R ²	α						
Azzaba	0.99	0.017	0.98	0.014	0.91	0.014	0.98	0.010
Pont Mdez	0.95	0.047	0.94	0.065	0.69	0.140	0.92	0.033
El Mers	0.79	0.062	0.81	0.063	0.97	0.056	0.82	0.038
Aït Khabach	0.87	0.219	0.98	0.014	0.91	0.014	0.98	0.010

4-3-Longues phases de tarissement observées et tarissement moyen

La valeur moyenne du coefficient α de tarissement calculé à la station d'Azzaba a été confrontée à 3 longues phases de tarissement, uniquement disponible pour l'été (fig.5.25). Ces phases s'ajustent à un coefficient α compris entre 11.10^{-3} et 13.10^{-3} donc comparable au coefficient moyen de 12.10^{-3} .

Figure 5.25: Courbe retenue et courbe théorique des grandes phases à la station d'Azzaba

Par exemple, pour la phase de juin à août 1988, au bout de 100 jours l'erreur sur le débit prévu avec un coefficient de 12.10^{-3} à partir du débit initial n'est que de 12,5% par rapport au débit mesuré.

Finalement la bonne cohérence entre tarissement mesuré et tarissement modélisé à partir de la loi de Maillet autorise pour le bassin versant du Haut Sebou et ses sous bassins l'utilisation des valeurs de α pour un usage prédictif ou de calcul sur les volumes inhérents à la ressource en souterraine, à la réserve régulatrice.

Conclusion du chapitre 5

L'analyse des crues a démontré l'importance de ces événements hydrologique dans la dynamique de l'écoulement et les possibilités d'alimentation du barrage en aval du Haut Sebou. Signalons ici que le barrage de Mdez en construction va emmagasiner ces volumes de crue et ainsi contribuer à l'alimentation de la nappe dominée par sa retenue.

Par ailleurs ce chapitre a permis de mettre l'accent sur l'étiage dans le bassin du Haut Sebou dont la connaissance des valeurs statistiques peut être utilisée dans le cadre de la gestion de la ressource en eau. Nous sommes bien conscients qu'en l'absence d'une législation spécifique à la gestion des eaux de surface ces considérations sur l'étiage ne revêtent qu'un intérêt théorique.

Enfin, l'approche menée sur les nombreuses phases de tarissement pour chacun des bassins à conduit à la caractérisation du comportement des aquifères en période de vidange par le coefficient de tarissement α de maillet. Moyennant certaines hypothèses il peut permettre une évaluation quantifié des ressources aquifères.

Ces variables caractéristiques relatives aux crues et aux tarissements sont les points d'appui de la modélisation hydrologique.

****Chapitre 6 : L'organisation spatiale des écoulements des basses eaux**

Sommaire

Introduction

I- Problématique et démarche utilisée

1- problématique

2- Démarche utilisée

2-1- Les points de mesure

2-2- Les techniques de mesure du débit

II- Les résultats

1-Le coefficient de tarissement

2- Les profils hydrologiques et les cartes de rendements

2-1- Les profils hydrologiques

2-2- La cartographie des débits

3- Interprétation des résultats

Conclusion

Introduction du chapitre 6

Dans ce chapitre nous présentons une méthodologie d'évaluation quantitative des ressources en eau dans le bassin versant du Haut Sebou, dans le Moyen-Atlas marocain. Cette méthodologie s'inscrit dans la problématique de l'exploration de la ressource en eau sur de vastes domaines peu accessibles ; Elle s'appuie sur la mesure de débits des cours d'eau en régime stabilisé, c'est-à-dire non directement influencé par les pluies. Ces mesures ont été faites dans le cadre de deux projets de recherche scientifique du CMIFM. Le premier a eu lieu à la fin des années 1990 et le second est en cours. Les résultats des mesures sont d'autant plus intéressants qu'ils renvoient à des fonctionnements hydrologiques correspondants à des périodes pluviométriques très contrastées. On tire de ces résultats une répartition spatiale des écoulements inhérents « aux rendements » des aquifères. Ils mettent en lumière les secteurs présentant les ressources en eau les plus favorables.

I- Problématique et démarche utilisée

1- Problématique

Une gestion efficace de la ressource en eau doit s'appuyer sur une connaissance précise et localisée de celle-ci. Or les processus hydrologiques souterrains et de surface sont soumis à des variations spatio-temporelles qui dépendent des entrées météorologiques et des caractéristiques physiographiques des terrains. Dans le cas d'une prospection de la ressource en eau soit on s'appuie sur les données aux stations hydrométriques, très lâches, soit on effectue des sondages dans les formations géologiques aquifères. Néanmoins pour ces deux types de prospection un problème d'échelle existe vis à vis de la variabilité spatiale. En effet, les variations brutales au sein de la roche aquifère rendent l'interpolation et l'extrapolation des données ponctuelles issues des forages, difficile et peu exploitable en terme d'écoulement. D'autre part, l'unité de travail des hydrologues, le bassin versant, n'est pas adapté à la prospection de la ressource en eau dans la mesure où les bassins versants équipés de stations ont plusieurs centaines de km² et sont inscrits dans plusieurs aquifères. Ainsi les débits globaux mesurés intègrent des différences qu'il est ensuite difficile de redistribuer dans l'espace (Margat, 1966).

2- Démarche utilisée

L'idée de la démarche exposée est de concilier l'échelle des hydrogéologues et celle des hydrologues, et donc de disposer de résultats de mesure distribués en fonction d'un critère prédominant pour la ressource en eau souterraine peu profonde et de surface à une échelle suffisamment grande pour s'affranchir de conditions très localisées, mais suffisamment petite pour intégrer les facteurs d'un milieu homogène : le bassin versant unitaire. Cette démarche a largement été utilisée dans le nord-est de la France où elle a permis notamment la réalisation de catalogue de débits d'étiage de référence pour l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (François, Sary, 1994). Lebaut a travaillé sur l'utilisation de ces données pour établir les paramètres clés de l'écoulement souterrain en milieux poreux sur des formations aquifères gréso-sableuses (Lebaut, 2000). A la fin des années 1990 les écoulements dans le bassin du Haut Sebou ont déjà été mesurés selon cette même démarche (Devos et Nejari, 1998) dans un contexte climatique de sécheresse pluviométrique.

Les résultats dont on fait part ici s'appuient sur ces dernières données mais également sur des données récentes collectées en 2010 et 2011 dans le cadre d'un programme scientifique franco-marocain (Action Intégrée du CMIFM n° MA 10-244: projet « SIGRES », 2010-2013); Ces deux années sont caractérisées par une pluviométrie importante. Ainsi nous disposons de données spatialisées de débits pour deux contextes pluviométriques contrastés. L'intérêt de cette nouvelle prospection réside dans la durée qui sépare les deux prospections mais également dans le contexte pluviométrique radicalement différent du précédent.

Pour que les « valeurs débit » renvoie à des propriétés de ressource en eau des aquifères il est nécessaire, en plus de les mesurer sur des sous bassins de lithologie homogène, qu'elles correspondent à un régime stabilisé de basses eaux ; Il s'agit donc de scruter la variabilité spatiale des écoulements pour une situation hydrologique stabilisée c'est-à-dire pour une période où les écoulements ne sont pas directement influencé par des précipitations : soit en période de tarissement dont il est admis que le débit est celui des aquifères. Dans ce cas le débit témoigne d'un rendement des aquifères.

Les mesures sont donc faites dans des situations hydrologiques stabilisées sur l'ensemble des sections verrouillant des bassins versants homogènes (bassins unitaires). On procède par campagne de mesure; Elles doivent être relativement circonscrites dans le temps de façon à avoir « un instantané » des écoulements dans l'ensemble du bassin-versant investigué. Les

débits instantanés sont calculés sur la base d'une exploration du champ des vitesses par un micro-moulinet.

2-1- Les points de mesure

Cette approche qualitative des potentialités de ressource en eau du haut bassin du fleuve Sebou a déjà été menée entre 1996 et 1998 par Nejari et Devos, période bien plus sèche que la période 2010/2011 sur laquelle portent nos mesures. Afin de conduire l'analyse à partir de ces deux périodes de pluviométrie contrastée nous avons repris les sections de mesures utilisées par Nejari et Devos à la fin des années 1990. Au total, sur les 2 périodes nous disposons de 8 campagnes de mesure de débits (tab.6.1). Le nombre de points jaugés est compris entre 39 et 88 par campagne ; Les surfaces des sous-bassins versant varient entre 10 et 50 km². Le nombre de points est fonction des contingences matérielles et humaines mais également des conditions climatiques rencontrées lors des sorties. En effet, les orages qui ne sont pas rares durant la période estivale, ont occasionné l'interruption de plusieurs campagnes. Par ailleurs, le choix des points est en fonction de leur accessibilité, et tient compte de la lithologie, des confluences, et des influences anthropiques (prélèvements).

Tableau 6.1 : Nombre de points jaugés par campagne

	Mai 96	Avr 97	Oct 97	Jui 98	Juil 10	Mai 11	Juil 11	Sep 11
Nbre pts jaugés	64	88	62	80	44	39	36	39

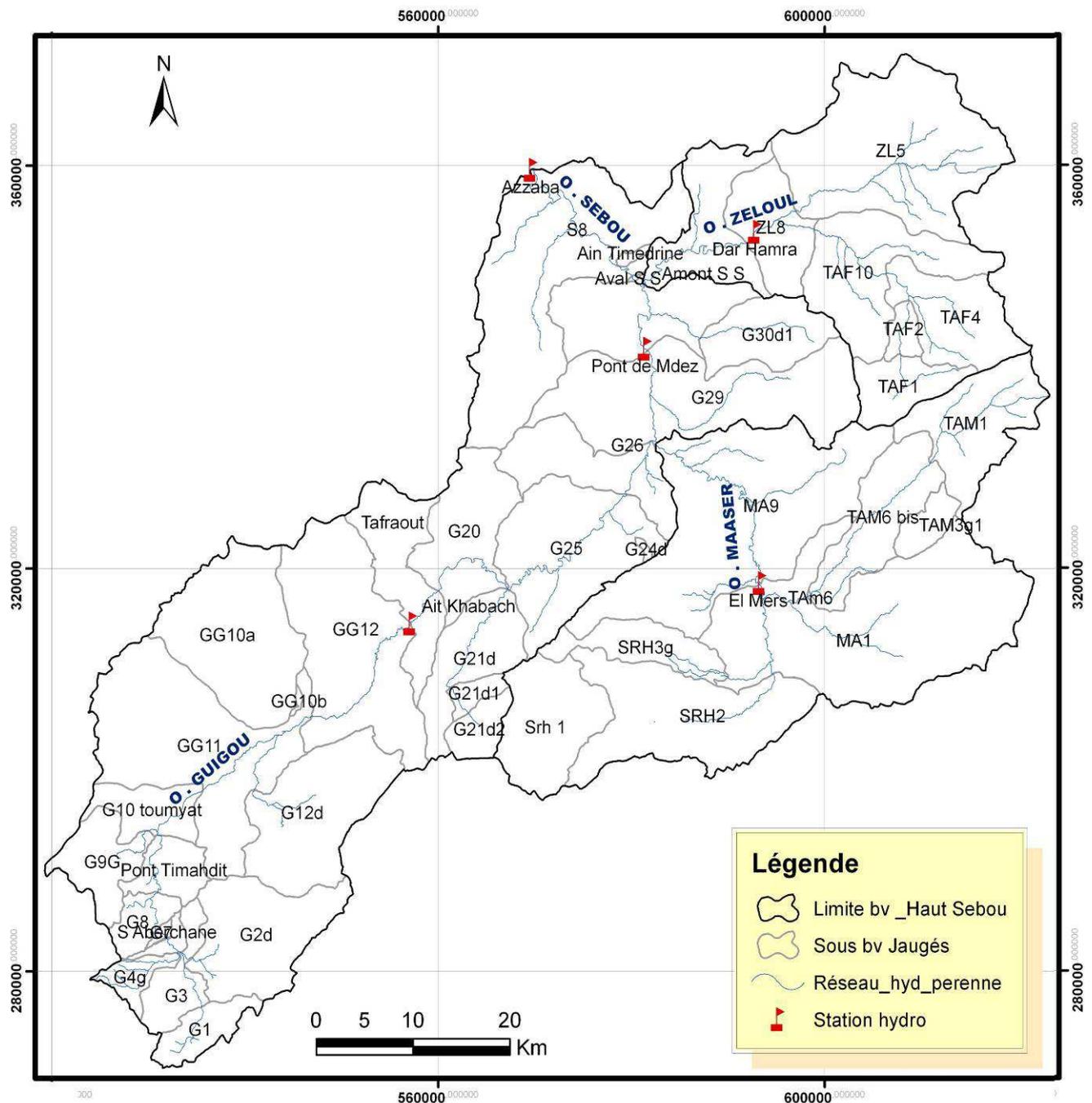
Au final il y a 39 points communs aux 2 périodes de mesures (fig.6.1).

La désignation des points de mesures reprend la codification hydrographique mise en place par l'équipe de l'action intégrée 1005/95. Ces codes sont constitués des chiffres croissant de l'amont à l'aval et des lettres tirées des initiales de l'oued et de ses affluents (Obda, 2004). Une initial pour l'oued principal et selon l'ordre des affluents : 2 pour l'affluent principal ... etc. avec des lettre (d) et (g) expriment respectivement la rive droit et la rive gauche, exemple :

G1 = Guigou 1

G12d : G = Guigou ; 12 = numéro de point ; d = affluent de rive droite

Figure 6.1 : Localisation des bassins unitaires jaugés communs aux 8 campagnes



Pour effectuer nos mesures de débits nous avons utilisé plusieurs techniques de mesure appartenant à plusieurs catégories.

2-2- Les techniques de Mesure du débit

En fonction du type de section de mesure et du matériel disponible au moment des campagnes de mesures 2 types de méthode de mesurage du débit ont été utilisées.

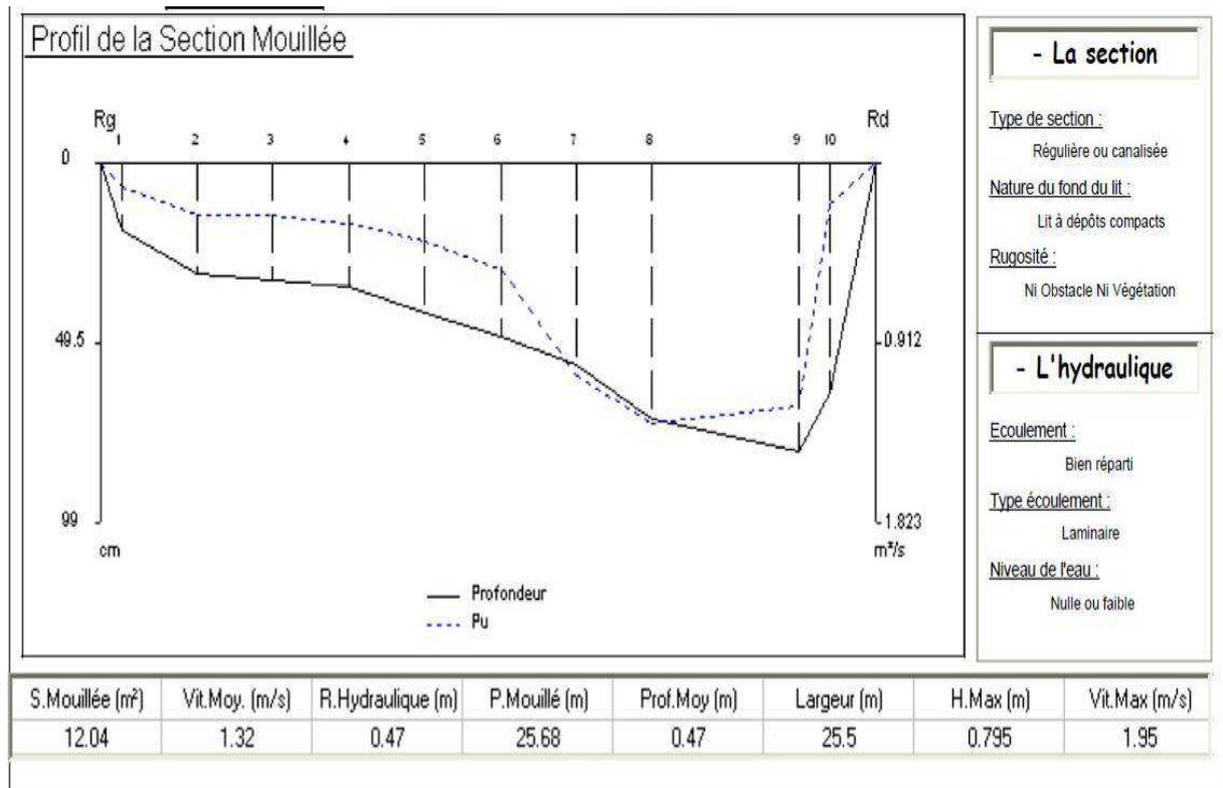
Méthodes complètes : jaugeage au moulinet:

Les méthodes complètes consistent à mesurer trois grandeurs séparément qui sont la vitesse moyenne, la hauteur moyenne et la largeur superficielle (fig.6.2). La hauteur et la vitesse sont mesurées à l'aide d'une perche munie d'un moulinet sur lequel est fixée une hélice (planche photo.6.1). Le nombre de tours d'hélice par unité de temps renvoi à la vitesse locale du fluide. En déplaçant la perche d'une rive à l'autre le champ des vitesses de l'eau est exploré.

Nous avons utilisé deux méthodes différentes pour obtenir la vitesse moyenne d'une section du cours d'eau :

- Le jaugeage par intégration directe : il consiste en un déplacement du micro-moulinet à vitesse faible et constante le long de la verticale afin d'obtenir directement la vitesse moyenne. On relève ainsi le nombre de tours d'hélice, la durée du parcours du moulinet le long d'une verticale et la profondeur de la verticale. Toutes ces données ainsi que l'abscisse du point sont inscrites dans une feuille de jaugeage (Annexe 6.1).
- Le jaugeage point par point : la vitesse moyenne est obtenue à partir de vitesses ponctuelles mesurées à différentes profondeurs ; Notre choix s'est porté sur la mesure des vitesses à 2/10 et 8/10 de la profondeur sur les verticales. Cette méthode, bien que simplifiée donne une bonne approximation de la vitesse moyenne et surtout dans notre cas permet une durée du mesurage contenu nécessaire à la rapidité de mise en œuvre de chaque campagne (1 semaine).

Les débits sont obtenus par le logiciel « lulu » (Manceau, 2010) à partir des valeurs saisies sur le terrain (Annexe. 6.1).

Figure 6.2 : Profil de la section mouillée de point de jaugeage S8

Mesures volumétriques : jaugeage au seau :

Il s'agit de remplir un seau de volume connu V et de mesurer la durée t permettant le remplissage. Le débit est obtenu par: $Q = V/t$.

L'application de cette méthode se restreint aux débits faibles jaugés au niveau des seuils et cascades (planche photos 6.2).

Après traitement et dépouillement des données, les résultats sont valorisés par les profils hydrologiques et la cartographie des rendements. La représentation des débits, cartographique ou linéaire (profil hydrologique), affine la typologie en mettant en lumière la disparité spatiale des écoulements de nappe en fonction de la position géographique des aquifères (Lebaut, 2000).

Planche photos 6.1 : Le jaugeage avec la perche Pirée et point par point

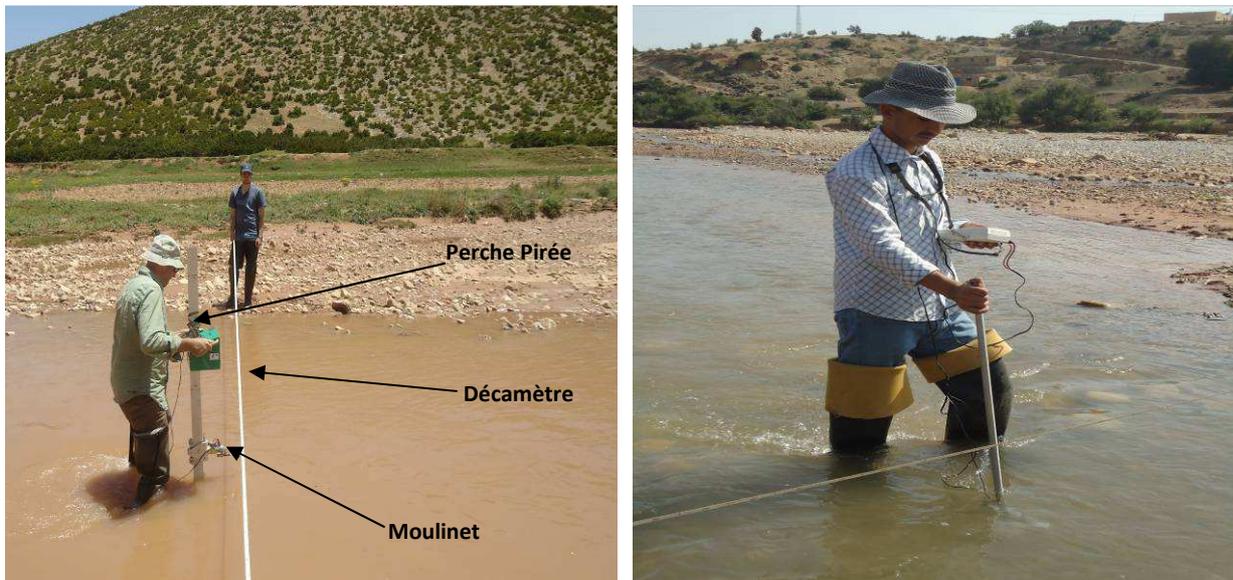


Planche photos 6.2 : Exemple du point de jaugeage au seuil : G21d2 et Srh1



Planche photos 6.3 : Exemple des mesures effectuées durant les campagnes de jaugeage dans la zone d'étude (Juin 2010, Mai 2011, Juillet 2011 et Septembre 2011).



II- Les résultats

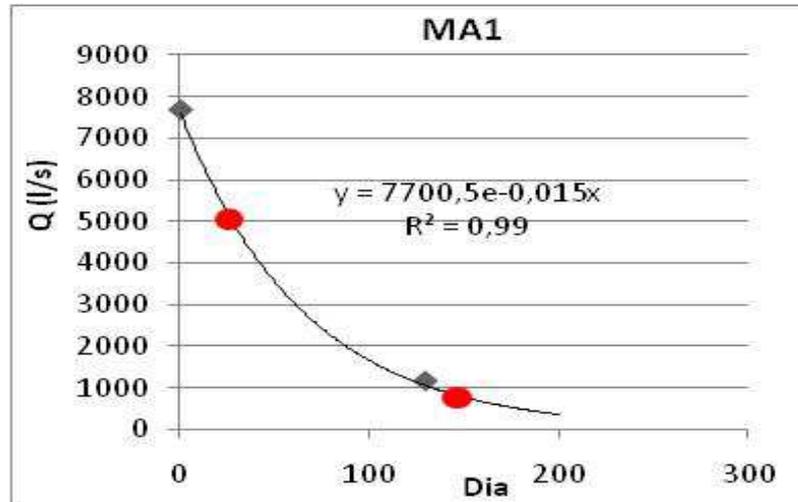
Les mesures de débit obtenues pour les 39 bassins versants unitaires rendent compte des potentialités de la ressource en eau à travers 3 types d'information, le coefficient de tarissement par sous bassin, le profil hydrologique et le rendement hydrologique par sous bassin

1-Le coefficient de tarissement

L'analyse du tarissement étudie la fonction $Q=Q(t)$ en régime non influencé par les précipitations. Basée sur des équations théoriques qui régissent la circulation de l'eau souterraine, la décroissance des débits des aquifères peut être représentée comme une fonction des caractéristiques de l'aquifère : « le coefficient de tarissement renferme des informations concernant le stockage et les caractéristiques des aquifères » (Tallaksen, 1995). De nombreux auteurs ont formulé des équations de tarissement ; Notre choix s'est porté sur la formulation

la plus utilisée, celle de Maillet. A partir d'un débit initial (Q_0), elle exprime la décroissance du débit en fonction du temps (t) de la façon suivante : $Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$

Figure 6.3 : Exemple de construction d'une courbe de tarissement



La valeur du coefficient de tarissement renvoie donc à la vidange plus au moins rapide de l'eau contenu dans les formations aquifères du bassin versant. La détermination des valeurs du coefficient de tarissement s'appuie sur 4 campagnes, celles d'avril et octobre 1997 et celles de mai et septembre 2011. Elle procède d'un ajustement manuel des variables « débit » de telle façon à ce que les 2 phases de tarissement distinctes ne fassent qu'une phase théorique répondant à la formulation de Maillet (fig.6.3) (Sugiyama H., 1996). De la sorte on obtient un coefficient α de tarissement moyen.

2-Les profils hydrologiques et les cartes de rendements

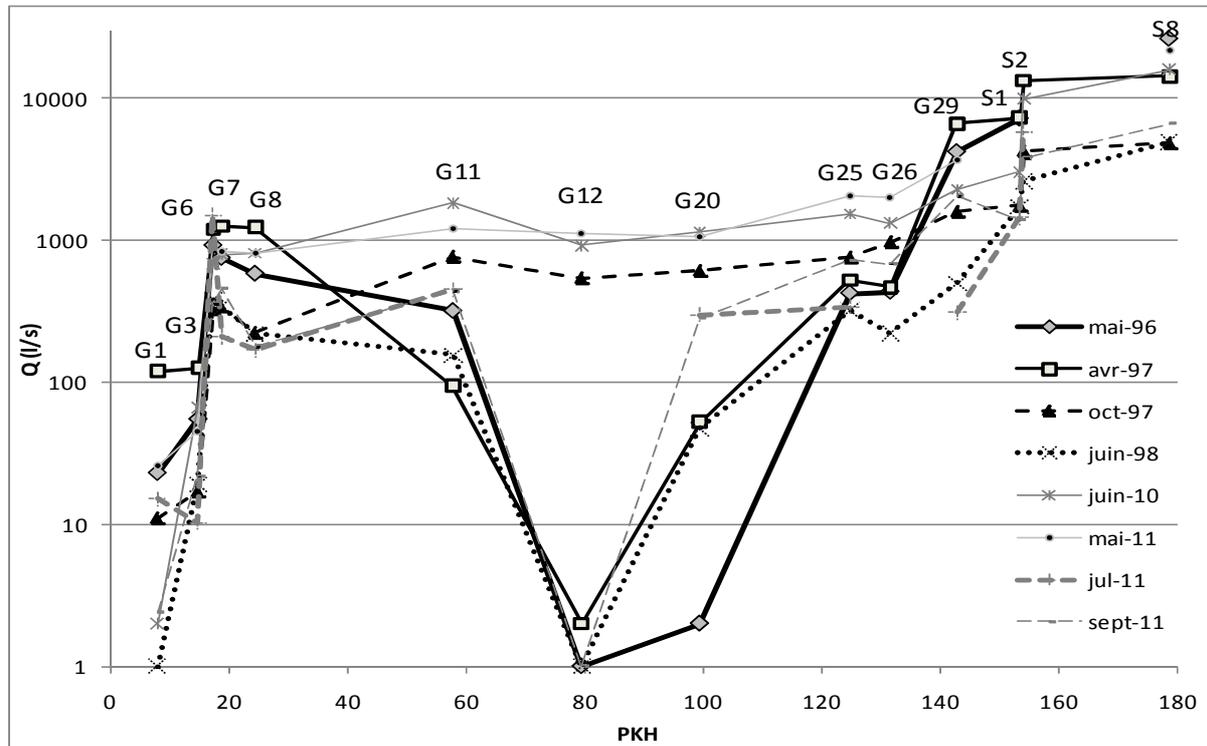
2-1- Les profils hydrologiques

La méthodologie dite des « profils hydrologiques » développé par le CEGUM permet d'appréhender quantitativement les modalités de l'alimentation d'un cours d'eau en basses eaux sur son linéaire ou en fonction de sa surface (Obda et al., 2000 ; Lebaut, 2000). Ils matérialisent l'évolution cumulative du cours d'eau et renvoient ainsi les réalités géographiques du bassin-versant où ils mettent en évidence "la complexité des paramètres naturels intégrés du bassin" (Sary, 1993)

Ces profils hydrologiques sont représentés sur un graphique de type courbe qui montre l'évolution des débits bruts et des débits spécifiques du cours d'eau de l'amont vers l'aval en fonction de la surface de bassin-versant ou des points kilométriques (Lejeune et al., 1989).

La figure 6.4 présente les profils hydrologiques pour les 8 campagnes de jaugeages réalisées dans le bassin. L'analyse de ces profils hydrologiques, au regard de la géologie des affleurements traversés par le cours d'eau, apporte des informations en matière de rendement hydrologique des terrains.

Figure 6.4: Profils hydrologiques du cours d'eau principal (Guigou-Sebou)



En première lecture ces profils conduisent à ces 3 remarques générales :

.une grande variabilité entre les différentes campagnes de jaugeages, ce qui traduit la situation hydrologique de chaque campagne de mesure.

.le débit du cours principal du haut Sebou connaît une grande variabilité de l'amont vers l'aval, cette hétérogénéité spatiale des écoulements reflète la diversité géographique du milieu.

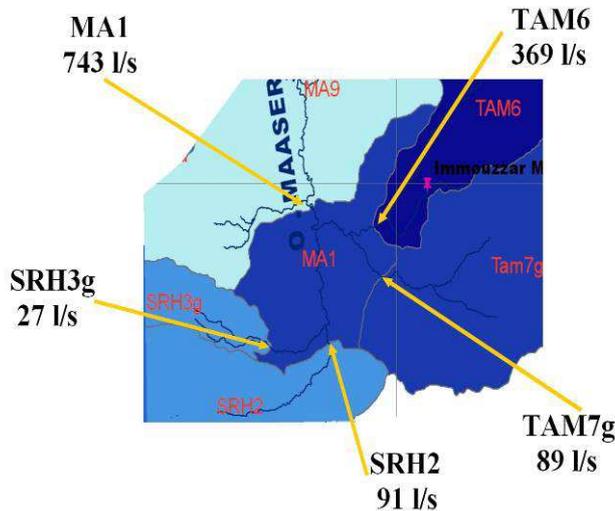
.la pente d'un segment traduit l'augmentation ou de la diminution du débit de la zone homogène de bassin versant relative à ce segment entre deux points de mesure.

2-2- La cartographie des débits

Le rendement hydrologique en l/s/km² représente la production en eau du bassin unitaire. Il équivaut pour un sous bassin au débit sortant moins le débit entrant (fig.6.3). Ce résultat est

valorisé sous la forme d'une cartographie des rendements hydrologiques (Zumstein, 1976) il s'agit d'une méthode qui consiste à représenter pour chaque bassin élémentaire, le débit spécifique.

Figure 6.5 : Exemple de calcul du rendement hydrologique



Exemple pour MA1 : 743 l/s pour
111.23 km² soit 6.67 l/s/km

Cette spatialisation des rendements permet de mettre en évidence l'apport ou la perte d'eau entre deux points de mesure successifs en s'abstrayant du poids des apports latéraux (Arts et al., 2000).

3- Interprétation des résultats

L'analyse des profils (fig.6.5) permet de découper le bassin du Haut Sebou en quatre parties que l'on peut qualifier d'homogènes. Ces parties correspondent d'une part à des conditions d'alimentations et des unités géographiques homogènes (Nejjari et al., 2000), et d'autre part à des conditions de prélèvements homogènes également, c'est le cas notamment de la plaine de Guigou.

Chacun de ces tronçons est analysé de manière fine à partir des caractéristiques de rendement (fig.6.6, 6.7, 6.8, 6.9 et annexe 6.2), de variabilité d'une campagne à l'autre et de coefficient α de tarissement.

La première partie : Le bassin amont G1 à G12 (la plaine de Guigou-Timahdite)

Les formations du Lias (calcaires) et du Crétacé (marnes et calcaires), recouvertes par les épanchements de basaltes favorisent des écoulements liés aux vidanges des réservoirs par

deux sources principales (Aberchan et Tit Zil) au niveau du fond de vallées fossilisées par les basaltes du Quaternaires (Nejjari, 2000).

La diversité morphostructurale de ce bassin, et le fonctionnement d'alimentation et d'irrigation permetent de distinguer entre deux secteurs différents.

La première sous partie : elle correspond à un fonctionnement naturel de l'oued (point G1 : la sortie du lac d'Aguelmam Sidi Ali à G8). Dans ce secteur les écoulements de l'oued sont tributaires de l'aquifère basaltique mais selon deux modes de fonctionnement comme en témoignent la variabilité des débits et les coefficients de tarissement ; En position « perchés » dans les basaltes les débits varient fortement en liaison avec un coefficient de tarissement élevé ($\alpha > 1,5.10^{-2}$) pour les sous bassins G2d et G3 par exemple. Par contre en position proche du mur de la nappe l'oued draine en permanence la nappe ce qui est en accord avec de plus faibles coefficients de tarissement ($\alpha < 1,1.10^{-2}$) et des rendements supérieurs à 5l/s/km² (exemple de G4g) ainsi qu'avec l'existence de sources comme celle d'Aberchane dont le coefficient de tarissement est très faible ($\alpha = 7.10^{-3}$). Il s'agit d'une émergence de la nappe basaltique qui assure la pérennité de l'écoulement.

La deuxième sous partie : de G11 à G20, est le domaine de la plaine agricole du Guigou (les Ait Youssi). Les écoulements de surface sont largement utilisés pour l'irrigation, par prélèvement directe (motopompes et dérivations). Un dense réseau de canaux impacte considérablement les écoulements naturels comme en témoigne la forte variabilité du débit pour ces points de mesure (de 0 à plus de 1m³/s pour une même période). Ces prélèvements limitent la portée des résultats des mesures quant à la quantification de la ressource en eau. Néanmoins la ressource en eau souterraine dans les basaltes est toujours importante dans ce secteur comme l'atteste le débit quasi constant de la source de Tit Zil (de l'ordre de 190 l/s pour mai, juillet et septembre 2011). Les eaux de la source de Tit Zil soutenus par un chapelet de petites sources et de griffons viennent régulariser et renforcer le débit. Les cartes de rendements (point G10b) confirment bien les apports ajoutés au cours d'eau et la hausse de débit.

Rappelons que les apports des affluents de l'oued Dardoura et Ain Nokra sont très faibles est souvent déviés vers les seguias avant de rejoindre l'oued Guigou.

L'ensemble de ce secteur amont est donc caractériser par des réserves aquifères conséquentes mais largement sollicitées pour l'agriculture.

Photo 6.1 : Assèchement complet de l'oued Guigou a cause des prélèvements (point de mesure G11, juillet 2011)



Photo 6.2 : Confluence de l'oued Guigou avec source d'Aberchane



La deuxième partie : le bassin médian (Le secteur de Tarhroute et la dépression de Skoura (G20 à G26)).

A l'aval du secteur précédent, l'oued Sebou traverse une épaisse formation carbonatée qui constitue un aquifère multicouche (calcaires et marnes) dont les rendements importants entraînent une faible variabilité des débits (points G20 à G26) en liaison avec un faible coefficient de tarissement et un rendement proche de 5 l/s/km² pour septembre 2011 (mois d'été). Avant la dépression de Skoura, les apports latéraux sont quasiment absents puisque le principal affluent dans ce tronçon, l'oued El Atchane, est souvent à sec ou transporte les eaux polluées d'assainissement de la ville de Boulemane. Après la confluence (l'oued Gigou avec El Atchane), l'écoulement est assuré par la présence de sources (émergences au pied du Jbel Tichoukt). Donc la hausse du débit apparait clairement au point G25 et témoigne d'un drainage plus stabilisé de nappes dans les formations du Bathonien.

Photo 6.3 : Cascade Immouzar Marmoucha



Après ce secteur, l'oued Guigou débouche dans la dépression de Skoura où affleurent des formations hétérogènes constituées de marnes gypseuses et les grés friables du Jurassique moyen et du Miocène (Martin, 1986). Dans cette dépression, l'oued Guigou reçoit plusieurs affluents de rive droite garantissant la majorité d'écoulement.

La troisième partie (G26 à G29)

La forte augmentation du débit au point G29 puis dans une moindre mesure au point S1 est le fait des apports de l'oued Mâassèr puis de l'oued Zloul. L'oued Mâassèr présente de plus grandes potentialités de ressource en eau en liaison avec des formations gréseuses comme en témoigne le coefficient de tarissement de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-2}$ pour MA1 (3.02 l/s/km²) et MA9 (5.85 l/s/km² en mai 2011), (cf. les cartes des rendements). Sur ce bassin montagneux d'environ 1300 km², les aquifères sont surtout productifs à l'amont comme en témoigne les rendements élevés pour TAM6 grâce au soutien de la source de Skhounat. Par contre les rendements négatifs à l'aval sont vraisemblablement le fait de phénomènes d'inféro-flux ; Ceci serait le corolaire d'une nappe alluviale conséquente. Toutefois, le bassin du Mâassèr peut assurer jusqu'au 40% d'écoulement (mai, 96) où l'apport de ce bassin (MA9) peut tripler ou quadrupler le débit de l'oued Guigou (G26) (tab.6.2).

Tableau 6.2 : Résultats des campagnes de jaugeages aux point G26 et MA9 en l/s

point de mesure	mai-96	mai-96	avr-97	oct-97	jui-98	jui-10	mai-11	juil-11	sep-11
G26 *	436	436	467	978	223	1322	2022	N,G	682
MA9 *	3203	3203	5853	695	283	1051	7054	N.G	557

*G26 : L'oued Guigou avant confluence avec Mâassèr ; MA9 : Exutoire du bassin versant Mâassèr

L'oued Zloul, affluent de rive droite, présente de faibles ressources en eau conformément à son substratum composé de formations imperméables (Marnes, argiles rouges et schistes); Les rendements sont inférieurs à 1 l/s/km² pour septembre 2011 pour un coefficient de tarissement fort, de 3,1.10⁻². En revanche, les apports de ce bassin peuvent être considérables en situation de hautes eaux ou lors d'années connaissant d'importantes chutes de neige sur le massif de Bou Iblane (3190 m).

Tableau 6.3 : Contribution en (%) du bassin Mâassèr et Zloul à l'écoulement du Haut Sebou

Point de mesure	mai-96	mai-96	avr-97	oct-97	jui-98	jui-10	mai-11	juil-11
Bassin Mâassèr	12,13	40,65	14,26	5,74	6,56	29,39	N.G	8,33
Bassin Zloul	9,89	11,42	33,72	1,91	1,87	7,29	1,61	1,02

La quatrième partie (S1 à S8)

Dans le secteur aval l'oued Sebou traverse les causses du Moyen-Atlas. La forte augmentation du débit entre S1 et S8 est le fait d'un important secteur de sources dans des calcaires ; Trois sources karstiques (Ain Sebou, Ain Ouamander, Ain Timedrine) sont bien individualisées en rive droite du Sebou. Ces sources sont considérées comme des points d'interactions hydrologiques entre l'oued et le Karst profond (Akdin et al., 2012). De forts rendements, près de 2,5 m³/s sur 400 m de linéaire (plus du tiers du débit à la station d'Azzaba) couplés à un faible coefficient de tarissement (de l'ordre de 6.10⁻³) rendent compte d'un aquifère de forte potentialité. Ces sources assurent la pérennité régulière de l'oued Sebou en saisons et années très sèches. Nicod (1993) confirme que la forte contribution des ressources en eau dans cette zone est liée à la pondération remarquable qui traduit une aquifère plus capacitif que transmissif. En revanche, (Akdin et al., 2012) affirment que malgré l'importance du débit assuré par la source d'Ain Sebou (qui atteint 897 l/s en juin 98, 6915 l/s en juin 2010, 4389 l/s en juillet 2011 et 2403 l/s en septembre-2011), cette source peut s'assécher en périodes de longues sécheresse, et comme en 1995 se transformer en tunnel d'absorption (ponor Karstique) des eaux superficielles provenant de l'amont du bassin, comme le Mdez et Guigou. Ce phénomène de siphonages des eaux superficielles provenant de l'amont avait déjà été évoqué par Corbel (en 1952).

L'alimentation de ce complexe sourcier fait l'objet de débats. Des auteurs ont posé l'hypothèse que l'alimentation se fait par les eaux issue des sous bassins du Haut Sebou tandis que Nicod (1993) et Nejjari (2002) rattachent l'alimentation de ce complexe hydro-karstique à la nappe dolomitique au Causse c'est-à-dire la rive gauche de l'oued. Tandis qu'El Khalki (1990) suppose une alimentation à partir des reliefs de Bou Iblane (Akdim et al., 2012).

Photo 6.4 : Confluence de l'Oued Guigou-Mdez avec Ain Sebou, où il prend le nom de l'oued Sebou



Figure 6.6 : Rendement hydrologique par bassin unitaire pour mai 1996

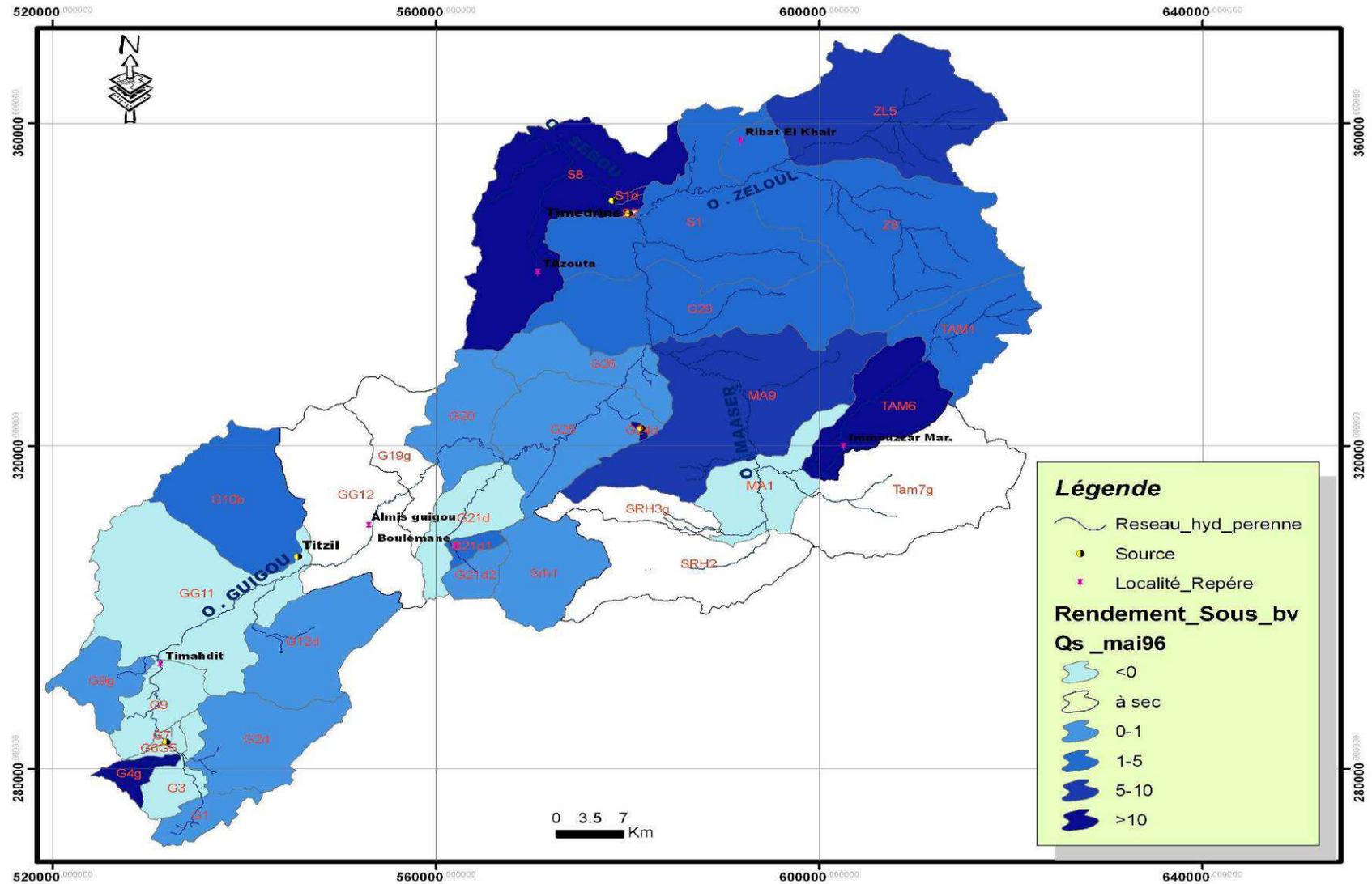


Figure 6.7 : Rendement hydrologique par bassin unitaire pour mai 2011

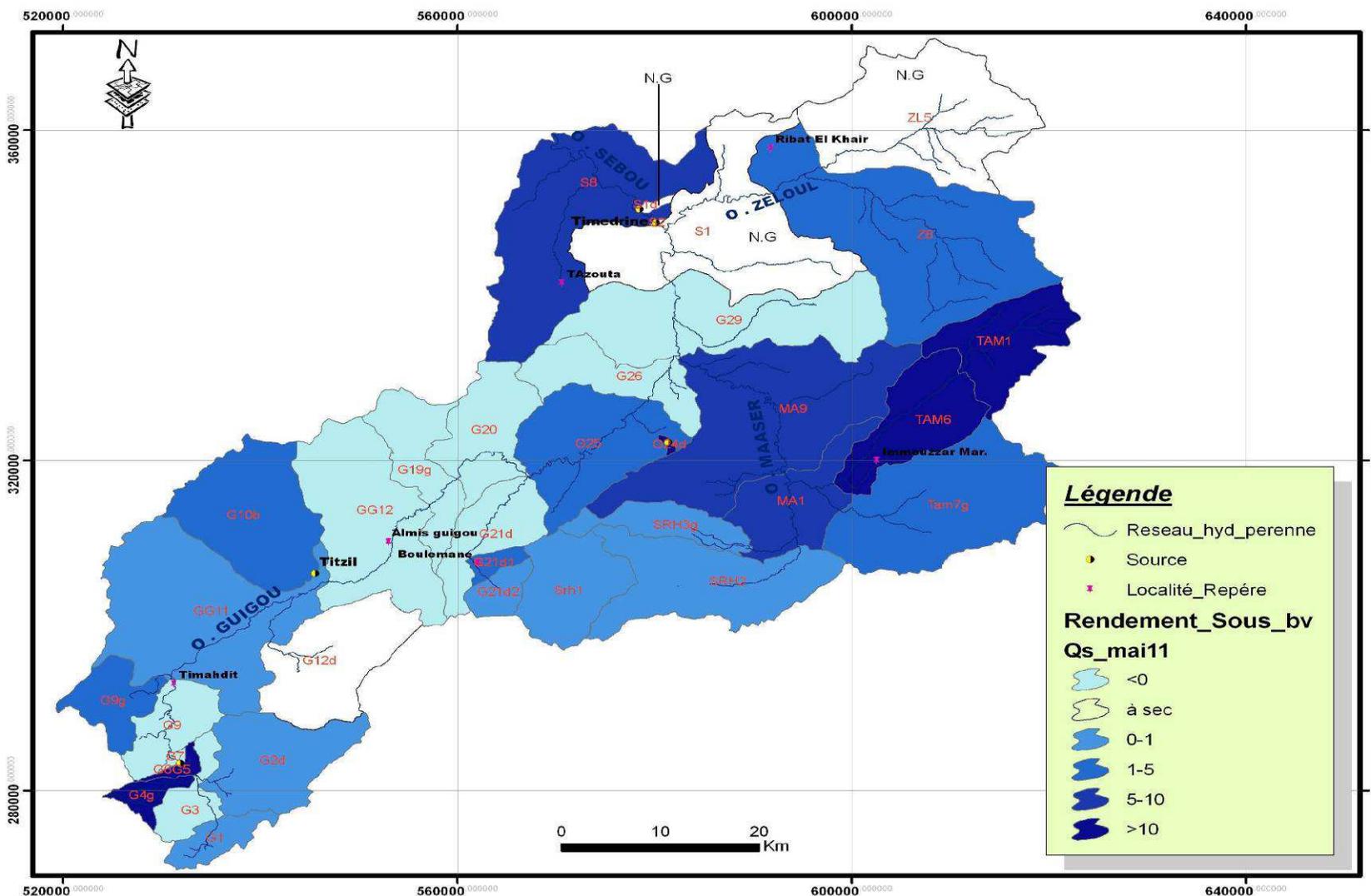


Figure 6.8 : Rendement hydrologique par bassin unitaire pour septembre 2011

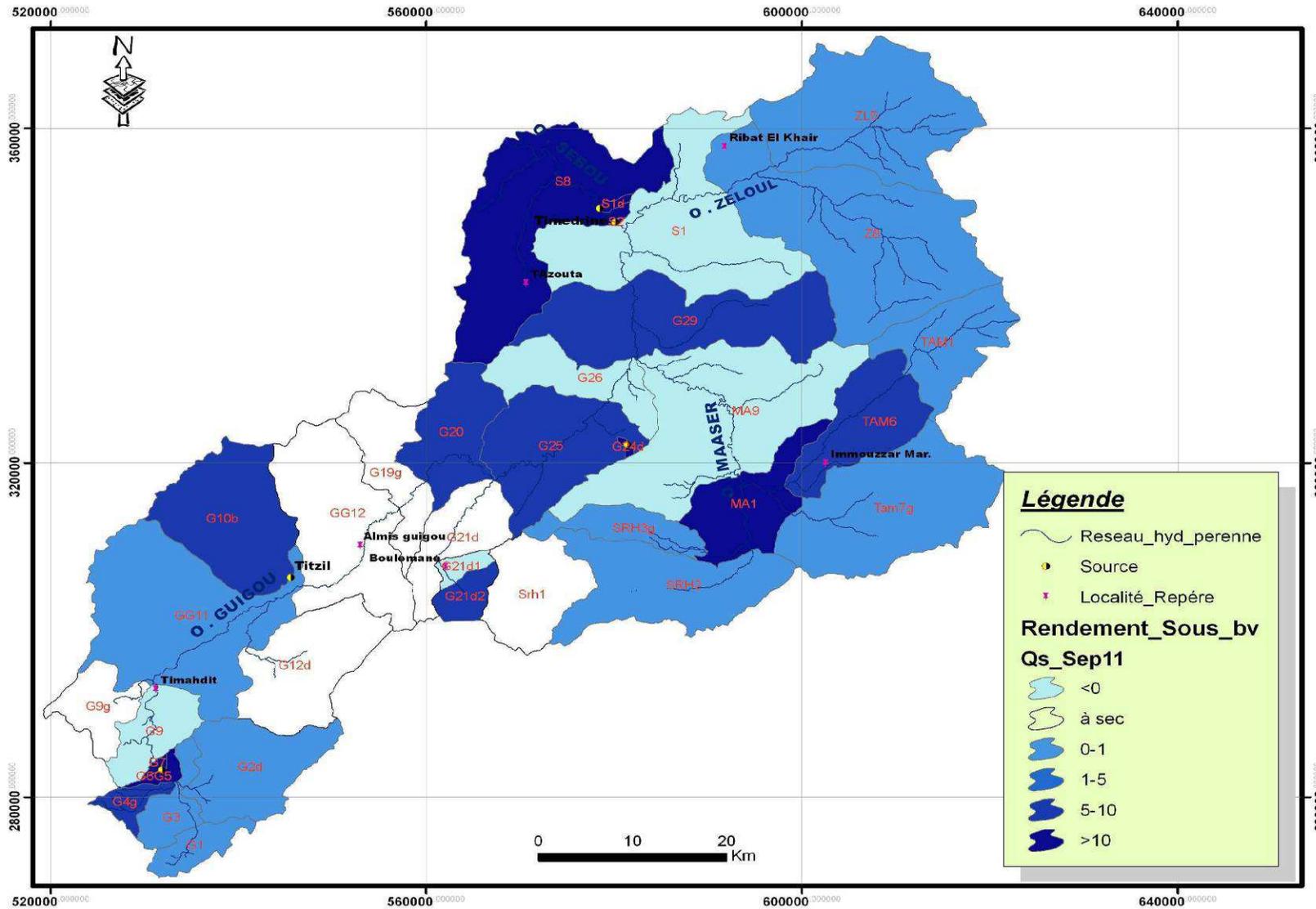
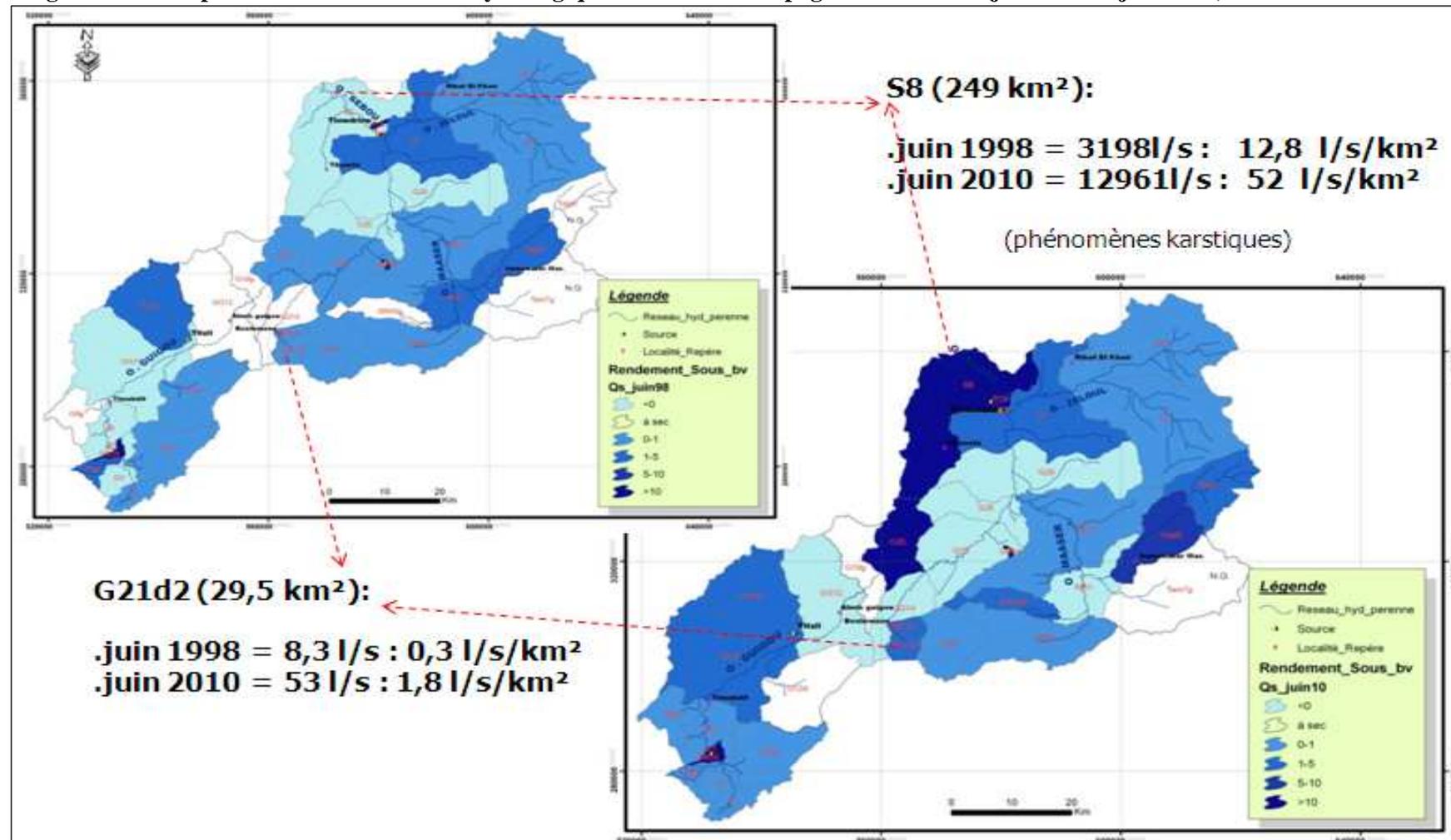


Figure 6.9 : Comparaison des rendements hydrologiques entre deux campagnes de mesures (juin 1998 et juin 2010)



Conclusion du chapitre 5

Les mesures de débits en régime non directement influencé sur l'ensemble du réseau hydrographique permettent une appréciation fine de la ressource en eau du bassin versant du Haut Sebou. Néanmoins les résultats de cette démarche peuvent être biaisés du fait d'impacts anthropiques sous la forme de prélèvement d'eau, notamment dans les secteurs les plus agricoles. Il faut par conséquent s'appuyer sur de nombreuses campagnes de mesure pour espérer en extraire le « bruit anthropique ». Ceci étant, les résultats acquis pour les années 2010 et 2011 confirment ce qui a été mis en évidence dans les travaux précédents à partir des mesures faites à la fin des années 1990, dans un contexte de déficit pluviométrique marqué. Les conclusions les plus intéressantes sont apportées par la comparaison des valeurs de débits entre ces deux périodes ; Elle témoigne d'une très faible inertie de l'ensemble des systèmes aquifères. Cela explique que, bien que cette partie du Moyen-Atlas soit constitué par environ 50% de terrain perméable et présente donc de bonnes potentialités de ressource en eau souterraine, elle ne soustrait pas pour autant les populations au risque de sécheresse hydrologique si les pluies viennent à manquer pendant plusieurs années consécutives. Enfin, cette démarche de prospection, bien que nécessaire, ne suffit pas à la connaissance fine du fonctionnement de l'hydrosystème Sebou. C'est la raison pour laquelle ces résultats de terrain enrichiront la démarche de modélisation hydrologique (dernier chapitre).

Conclusion de la 2^{ème} partie

Quelque soit le niveau temporel ou spatial d'analyse des débits, ce sont l'hétérogénéité et les redistributions souterraines de l'eau qui sont les traits dominant du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Haut Sebou.

Tout d'abord à l'échelle annuelle, une première confrontation des termes du bilan hydrologique démontre que les volumes d'eau mesurés aux stations ne peuvent s'expliquer que par une perte au profit de bassins limitrophes et une contribution des bassins amonts à l'alimentation du complexe sourcier d'Ain Sebou.

Ensuite, à l'échelle de l'épisode pluvieux les résultats de la décomposition des hydrogrammes ont mis en évidence les faibles valeurs des coefficients d'ERC sur l'ensemble du bassin, néanmoins un peu plus élevées sur le bassin du Zloul. Il apparaît cependant que les volumes de crue peuvent contribuer pour une large part dans les écoulements totaux annuels. Ces deux constats vont dans le sens de valeurs de déficits d'écoulement élevées. Toutefois, les valeurs à la station d'Azzaba tranchent très nettement avec ce qui se passe dans le reste du bassin et vont plutôt dans le sens d'apport par les nappes. En effet, l'étude des phases de tarissement a mis en évidence, par un coefficient α de maillet maître, la plus faible décroissance des débits à la station d'Azzaba en périodes non pluvieuses qu'aux autres stations, ce qui est attendu compte tenu de la présence du complexe sourcier d'Ain Sebou juste en amont. Aux autres stations les coefficients de tarissement sont beaucoup plus forts en rapport avec une vidange rapide des formations aquifères et de très faibles débits d'étiage.

Enfin, à une échelle spatiale fine, la déglobalisation de l'information hydrologique par les mesures ponctuelles a néanmoins démontré que les différents bassins unitaires ont des potentialités contrastées. Malgré le bruit anthropique (prélèvements), les campagnes de mesures ont éclairci l'organisation de l'écoulement de base et révèlent le fonctionnement différencié des formations aquifères. Les profils hydrologiques montrent bien l'influence anthropique sur la ressource en eau. Elle fait l'objet de la partie suivante.

Partie III

*Le contexte humain, occupation
du sol et gestion des ressources
en eau*

Introduction de la troisième partie

Dans ce travail, il nous semble très important de traiter les aspects socio-économiques de la ressource en eau dans le bassin du Haut Sebou. En effet, après l'évaluation et la quantification de la ressource en eau et la mise en évidence du fonctionnement hydrologique du bassin du Haut Sebou, il est indispensable d'étudier la relation entre l'homme et l'eau à partir de l'usage de cette matière, surtout que ledit bassin constitue une zone fortement anthropisée et cultivée de la montagne atlasique. A travers l'histoire la région a subi des interventions qui ont engendré des modifications et des mutations au niveau de l'utilisation de la terre et des activités. Par ailleurs, devant les défis actuels, il apparaît en définitive important de diagnostiquer les modes archaïques et les pratiques traditionnelles en matière de gestion des ressources en eau et ainsi de contribuer à la réflexion sur les stratégies d'une gestion rationnelle et durable de l'eau, qui prennent en considérations les différentes menaces qui pèsent sur cette ressource (rareté, pollution...), surtout qu'il s'agit d'un contexte semi aride.

Le premier chapitre pose les conditions anthropiques et décrit l'occupation du sol dans la zone d'étude dans un cadre temporelle. Compte tenu de ses potentialités naturelles, le Moyen Atlas a vécu des mutations profondes liées à la croissance démographique et aux conditions politiques du Maroc. Ces mutations ont notamment concerné les activités humaines et la relation entre l'homme et la terre et l'eau.

Le deuxième chapitre aborde l'irrigation au Maroc et dans le Moyen Atlas dans son contexte historique et national. En effet, à partir de la phase coloniale l'irrigation constitue un axe majeur des stratégies de développement de l'état, et a connu dans ce cadre des interventions massives des pouvoirs publics en matière d'aménagements hydrauliques.

Par ailleurs les transformations socio-économiques dans le Moyen Atlas ont profondément marqué les pratiques agricoles ; On est passé d'un mode de transhumance à la sédentarisation, et à l'intensification de l'agriculture ce qui a abouti à une pression sur les ressources en eau.

L'objectif du dernier chapitre est d'apporter un diagnostic précis des mutations en cours sur le fonctionnement traditionnel et les pratiques de l'irrigation dans le bassin du Haut Sebou. Ce diagnostic est posé à partir d'une enquête réalisée du 8 mars au 21 avril 2012 auprès de 350 agriculteurs répartis dans les 15 000 hectares irrigués des différentes cuvettes du bassin, dont

la plaine de Guigou représente plus de la moitié. Il donne un aperçu des modalités d'exploitation des ressources en eau, et sur le savoir-faire développé par la population du Haut Sebou en matière d'utilisation de l'eau d'irrigation.

****Chapitre 7 : L'occupation du sol et les conditions anthropiques**

Sommaire

Introduction

I-Les caractéristiques anthropiques

1- Aperçu historique sur l'installation humaine et l'anthropisation dans le Hau Sebou

1-1-Anthropisation : Définition, Processus et conséquences

2- Bref rappel historique

II-Les caractéristiques démographiques

1- Le cadre administratif

2- L'évolution démographique

III-L'occupation des sols

1-Les terrains de cultures

2- La végétation naturelle

3- Les terrains incultes et les parcours

Conclusion

Introduction du chapitre 7

L'étude du facteur anthropique d'un bassin versant s'avère important pour en mesurer le poids de l'influence de l'homme sur l'hydrologie, car rappelons que « pour évoquer les problèmes de la ressource en eau de façon pertinente, il importe d'avoir une vision concrète et globale du fonctionnement du milieu naturel » (Cosandey et al., 2003, in Lang, 2007).

À travers l'histoire, la relation réciproque entre l'homme et les ressources naturelles d'un milieu est caractérisée par un comportement interactionnel. Cette relation est traduite par les activités exercées par l'homme, entre autres : l'occupation du sol, l'exploitation des forêts, les pratiques agricoles.... Il s'agit souvent d'activités qui s'appuyant sur la ressource en eau, en influencent leur abondance et leur rareté. De même, les aménagements hydrauliques perturbent largement l'hydrologie des cours d'eau, par leurs effets de laminage qui jouent un rôle évident et déterminant dans la perturbation du comportement hydrologique naturel des rivières (Taous, 2005).

Dans ce chapitre, nous rappelons le contexte démographique du Haut Sebou, en jetant un éclairage sur le processus d'anthropisation et d'installation humaine sur l'espace en question, tout en mettant l'accent sur l'utilisation du sol et les activités pratiquées par la population du Haut Sebou.

I- Les caractéristiques anthropiques

1- Aperçu historique sur l'installation humaine et l'anthropisation dans le Moyen-Atlas

1-1- Anthropisation : définition, processus et conséquences

Le PETIT LAROUSSE définit l'anthropisation comme étant « le processus par lequel les populations modifient ou transforment l'environnement naturel (La déforestation, l'élevage, l'urbanisation et l'activité industrielle sont parmi les principaux facteurs d'anthropisation) ». D'après le dictionnaire de l'environnement “ En géographie et en écologie, l'anthropisation est la transformation d'espaces, de paysages ou de milieux naturels par l'action de l'homme.”

D'après ces deux définitions, on peut retenir que l'anthropisation constitue l'action et l'effet de l'homme dans un espace naturel. Autrement dit, elle englobe toutes les interventions

humaines sur un espace purement naturel ainsi que ses répercussions directes et indirectes (érosion anthropique par exemple).

Cette relation réciproque entre l'homme et la nature a joué un rôle important dans le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes du milieu d'une part, et a d'autre part induit l'apparition de divers dysfonctionnements environnementaux et de multiples phénomènes extrêmes (changements climatiques, défrichement des forêts, dégradation des ressources en eau érosion agressive...).

Depuis l'antiquité, le processus d'anthropisation se déclenche dans tous les systèmes géographiques par une installation et fixation humaine jusqu'à la modification du géosystème (biosphère, lithosphère, hydrosphère...), sans toutefois négliger l'impact de l'exploitation des sous-systèmes et ses composantes naturels : eau, sol, végétation... (Sammaa, 2010).

En effet, cette interface entre la société et les différentes composantes de la nature porte une vocation multidimensionnelle, du fait des besoins humains sans cesse accrus pour satisfaire une population qui connaît annuellement une augmentation rapide.

Comme beaucoup de régions du Maroc, le Moyen-Atlas a connu des mutations profondes liées aussi bien à l'histoire politique du pays (succession des dynasties), à la croissance démographique de la population et aux changements socio-économiques.

1-2- Bref rappel historique

Sur la base d'une étude poussée de la population du Moyen-Atlas Jennan (2005) conclut qu'il est extrêmement difficile de dire de quelle manière s'est constitué le peuplement du Moyen-Atlas central. Selon les historiens, les premières vagues d'installation remontent au XI^{ème} siècle, ou avant l'avènement des Almoravides (milieu du X^{ème} siècle). La situation stratégique, la richesse et les potentialités naturelles du Moyen-Atlas sont des facteurs qui ont attiré les tribus pour s'y installer et pratiquer le nomadisme, la transhumance (la montagne en été et la plaine en hiver) et la vie pastorale sous des tentes. Ce mode de vie a contribué au maintien de l'équilibre entre les besoins des populations et des troupeaux et les potentialités du milieu, jusqu'au début du XX^{ème} siècle. Avant les grandes mutations socio-économiques qu'a connu la région, l'espace fonctionnait au rythme des saisons, dans un mouvement continu des populations et des troupeaux entre la moyenne montagne et les pâturages peu élevés et utilisables durant la saison froide (Nejjari, 2002). Cependant, toutes les tribus possèdent en

dehors des zones d'hivernage et d'estivage. En effet, cette transhumance était pour les éleveurs du Moyen-Atlas central une nécessité vitale. La mobilité est donc une nécessité économique et écologique pour les pasteurs car elle permet de faire face à la faible productivité nette du milieu et aux fortes variabilités et imprévisibilités des ressources qui caractérisent les milieux arides et semi-arides (Nori, 2007). Rappelons que les grandes confédérations tribales qui occupent la région étudiée sont : Ait Youssi et Bni Meguild dans le bassin du Guigou à l'amont de Tit Zil, Ait Serhrouchéne dans le bassin du Mdez et Mâasser, en fin, Bni Ouarain dans le bassin du Zloul. Le caractère rural domine le Haut Sebou, le phénomène urbain se limitant au Dir du Moyen-Atlas, comme c'est le cas des villes de Sefrou, Immouzzar Kander et Azrou par exemple.

De nombreux événements concourent depuis les années soixante à transformer les modes de vie de la population du Haut Sebou. À côté de l'abondance en eau et en terre, les changements de statut foncier remettent en cause les bases des systèmes collectifs pour promouvoir partout où cela est possible l'exploitation individuelle (Bourbouze, 1999). Cette nouvelle politique foncière a modifié le mode de vie des populations, ce qui a conduit à la sédentarisation et l'élargissement des espaces irrigués comme le souligne Tag (1996) : « les espaces pastoraux se vident progressivement au profit des vallées et des plaines riches en eau et en cultures. Il en est de même pour les douars les plus isolés de la montagne ». La sédentarisation est une tendance de plus en plus forte, qui a été socialement sélective, en touchant les groupes sociaux en fonctions de leurs conditions économiques (Bekkari, 2009). En effet, une partie de la population a trouvé les moyens pour faire de l'agriculture une nouvelle alternative, les autres ont continué à combiner entre l'élevage et l'agriculture. Après les années 1970, la région a connu une nouvelle dynamique des mutations, qui s'est traduit par une tendance à l'intensification agricole et à l'introduction massive des cultures plus consommatrices en eau pomme de terre, oignons. *In situ*, cela induit une forte pression sur les ressources en eau d'autant plus grande que les besoins des populations vont également croissant et que le contexte pluviométrique de ces trente dernières années a plutôt été à la sécheresse.

II- Les caractéristiques démographiques

1- Le cadre administratif

Administrativement, le bassin du Haut Sebou est une unité territoriale écartée entre quatre provinces de potentialités différentes. Dans le bassin on trouve 17 communes, dont 4 sont des

centres urbains, les autres étant des centres ruraux, Bien évidemment les limites communales ne correspondent pas aux limites topographiques des bassins.

2- L'évolution démographique

Du point de vue démographique, comme le remarquait déjà Jennan (2005), le Moyen-Atlas central n'a jamais été densément peuplé :

-Au XVI^{ème} siècle c'était un pays presque vidé utilisé comme pâturage d'été par quelques tribus (Léon l'africain, 1550).

- C'est à la fin du XVIII^{ème} siècle que s'est produit le grand mouvement à la suite duquel les tribus berbères Sanhaja ont occupé la partie centrale du Moyen-Atlas, poussant ainsi vers les plaines du nord-ouest d'autres tribus d'origine arabe ou berbère.

-Les tribus nouvellement installées n'ont jamais été nombreuses au début du XX^{ème} siècle. Là encore, la région était fort peu peuplée.

- En 1960, la densité y est toujours faible (12 hab/km²), les chiffres sont voisins pour la plupart des tribus qui s'y trouvent (Noin, 1970). Aujourd'hui, cette densité (27,5 hab/ km²) est encore largement inférieure à celles des montagnes voisines comme le rif par exemple, 120 hab/ km² (Grovel, 1996).

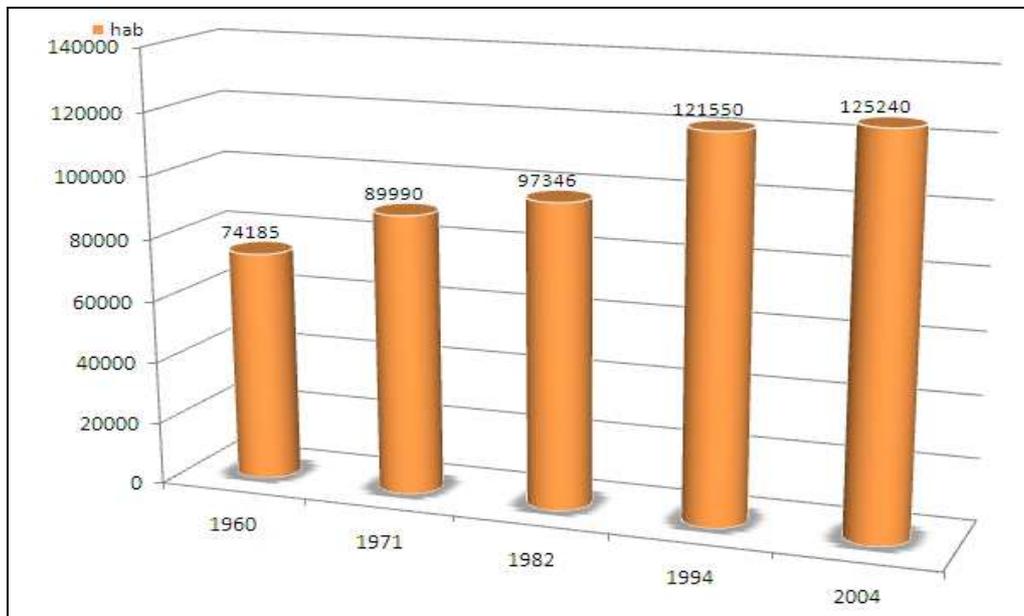
Il est aussi établi que le Moyen-Atlas est une région montagneuse différente des autres milieux montagnards marocains par son peuplement relativement récent, sa faible densité humaine (inférieure à la moyenne nationale), ses ressources naturelles variées (eau, forêt mines) et sa situation de zone de passage (Jennan, 2004).

D'après les recensements effectués au Maroc, la tendance de l'évolution de la population du Haut Sebou est la même que celle du Maroc. Pourtant, entre les communes cette évolution est marquée par des contrastes. En effet, les recensements généraux de la population et de l'habitat (1960, 1972, 1982, 1994 et 2004) ont montré que la population de la zone d'étude a connu une augmentation remarquable avec un rythme bouleversé.

En 1960, le nombre d'habitants dans le bassin du Haut Sebou était de 74 185, soit une densité de 15 hab /km². Cette densité est très faible par rapport à la moyenne nationale de l'époque, 29 hab/km². La population comptait en 1971 à peine 89 990 habitants. Ce chiffre passe à 97

346 habitants en 1982. Cette période (1971-1982) a enregistré un taux d'accroissement plus faible (0.72%) par rapport à la période précédente (1960-1971) (+1, 77%). En 1994, la population enregistrée est de 121 550 habitants. Actuellement, le nombre d'habitants dépasse 125 240 (recensement 2004).

Figure 7. 1 : Evolution de la population du Haut Sebou (RGPH : 1960, 1971, 1982, 1994 et 2004).



Ce fort taux d'accroissement de la population dans le Haut Sebou est surtout marqué dans les centres urbains où la population s'est accrue, par exemple, de 10 % durant la période intercensitaire 1982/1994. Cela signifie que l'accroissement naturel des régions rurales a été absorbé par les centres ruraux qui sont par la suite devenu des municipalités ou des centres urbains tels qu'Almis Guigou, Boulememane, Timahdite, Immouzzar Marmoucha. A titre de comparaison il n'existait qu'un centre urbain dans le bassin en 1960 Ribat El-Kheir. Cependant, actuellement ces centres sont multipliés, dont le mode de vie reste souvent rural, où la population s'appuie toujours sur les revenus agropastoraux.

Cependant, dans le bassin, on note une grande hétérogénéité dans le taux d'accroissement entre les communes. En effet, la concentration de la population se fait surtout sur les sites favorables à la pratique des activités agricoles, soit le long des oueds et des cuvettes et à proximité des sources. Par contre, les zones de montagnes ont une faible densité de population. L'évolution démographique et les différences entre les communes sont données dans le tableau suivant.

Tableau 7.1: Evolution démographique de la population dans les communes de Haut Sebou (RGPH : 1982,1994 et 2004).

<i>Population de la commune</i>	Années			Taux d'accroissement
	1982	1994	2004	1994/2004
IGHZRANE	12595	12657	11050	-1,3
AZZABA	2316	2459	2740	0,7
AHL SIDI LAHCEN	5919	5648	5290	-0,7
BOUYABLANE	2775	3336	3534	0,6
EL MENZEL	6617	10785	11484	0,6
OULAD MKOUDOU	8678	8364	7821	-0,7
RIBATE EL KHEIR	5205	8373	12654	4,2
DAR EL HAMRA	5045	4753	4022	-1,7
TAZOUTA	5241	5588	5745	0,3
ADREJ	3105	2516	2236	-1,2
TALZEMT	4381	4307	3710	-1,5
SKOURA M'DAZ	6896	8011	8713	0,8
GUIGOU	13422	16249	11059	1,6
AIT EL MANE	4099	5281	2243	-2,1
EL MERS	5660	6050	5891	-0,3
IMOZZER MARMOUCHA	-	2002	4001	4,8
TIMAHDITE	6788	8585	2507	1,6
AIT BAZZA	3668	3580	3480	-0,3
BOULEMANE	3295	6067	6910	1,3
SERGHINA	3760	3780	3726	-0,1

Les cartes ci-après (fig.7.2 et 7.3) présentent les données relatives à la variation des taux d'accroissement dans les communes du bassin du Haut Sebou pour les périodes intercensitaires (1982-1994) et (1994-2004). Les données indiquent que le taux d'accroissement démographique varie entre -2 et 5% durant la période 1982 et 1994 d'une part, et entre -1 et 2% durant la période 1994-2004 d'autre part. Cependant, l'évolution de la population des communes n'est pas totalement liée à la différence entre le taux de mortalité et de natalité, mais, il existe d'autres facteurs qui interviennent entre autres : l'augmentation du taux d'immigration qui est due essentiellement à la nature attractive de quelques zones de point de vue agricole (les opportunités du travail offertes par le secteur primaire (agriculture), c'est le cas par exemple de la région de Guigou), ou socio-économique (les activités commerciales, la scolarisations...). Cette migration prend une forme interne (entre les communes du Haut Sebou) ou une forme externe.

Figure 7.2 : Carte du taux d'accroissement annuel moyen de la population des communes situées dans le Haut Sebou et des communes limitrophes (RGPH : 1982, 1994).

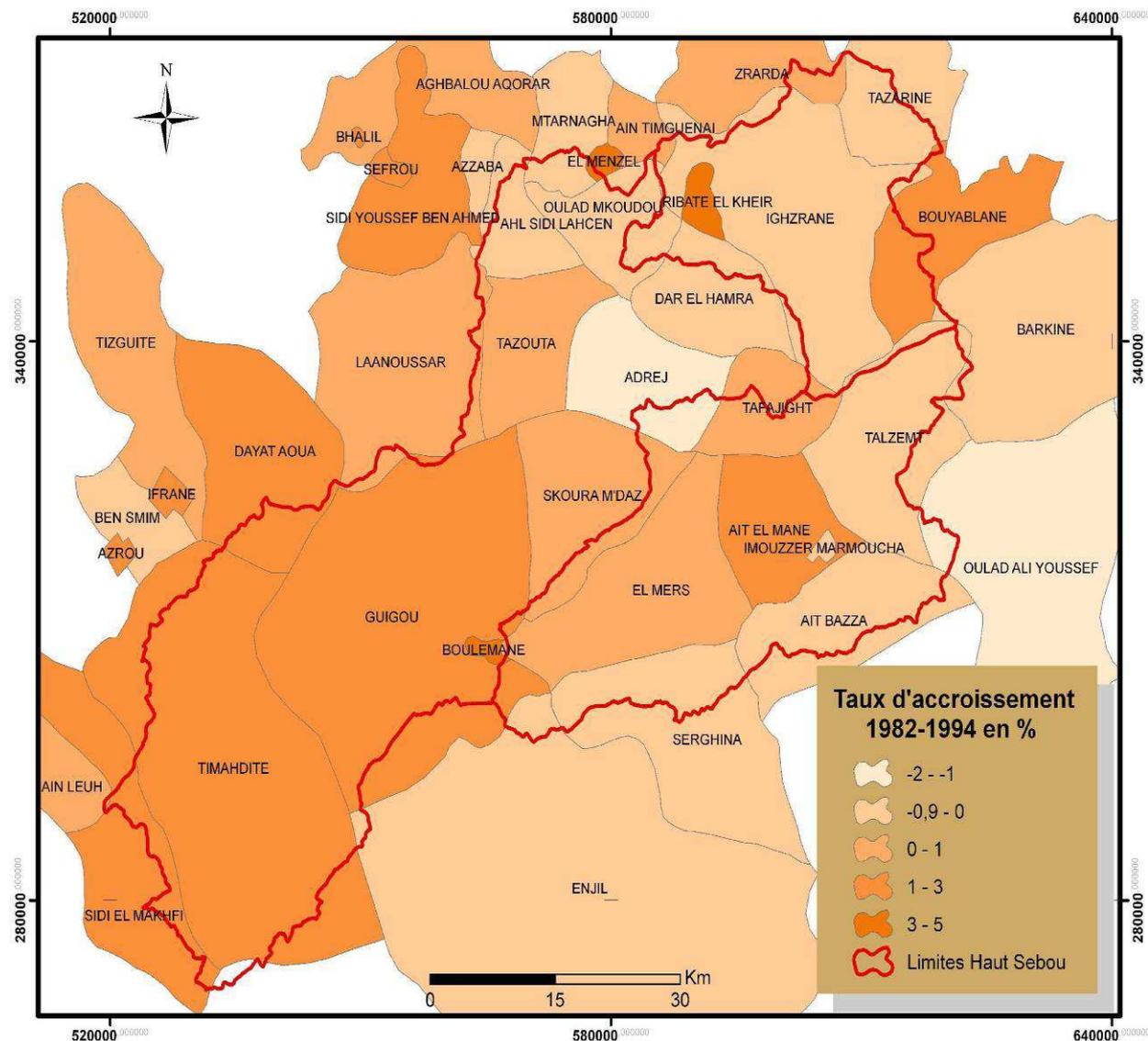
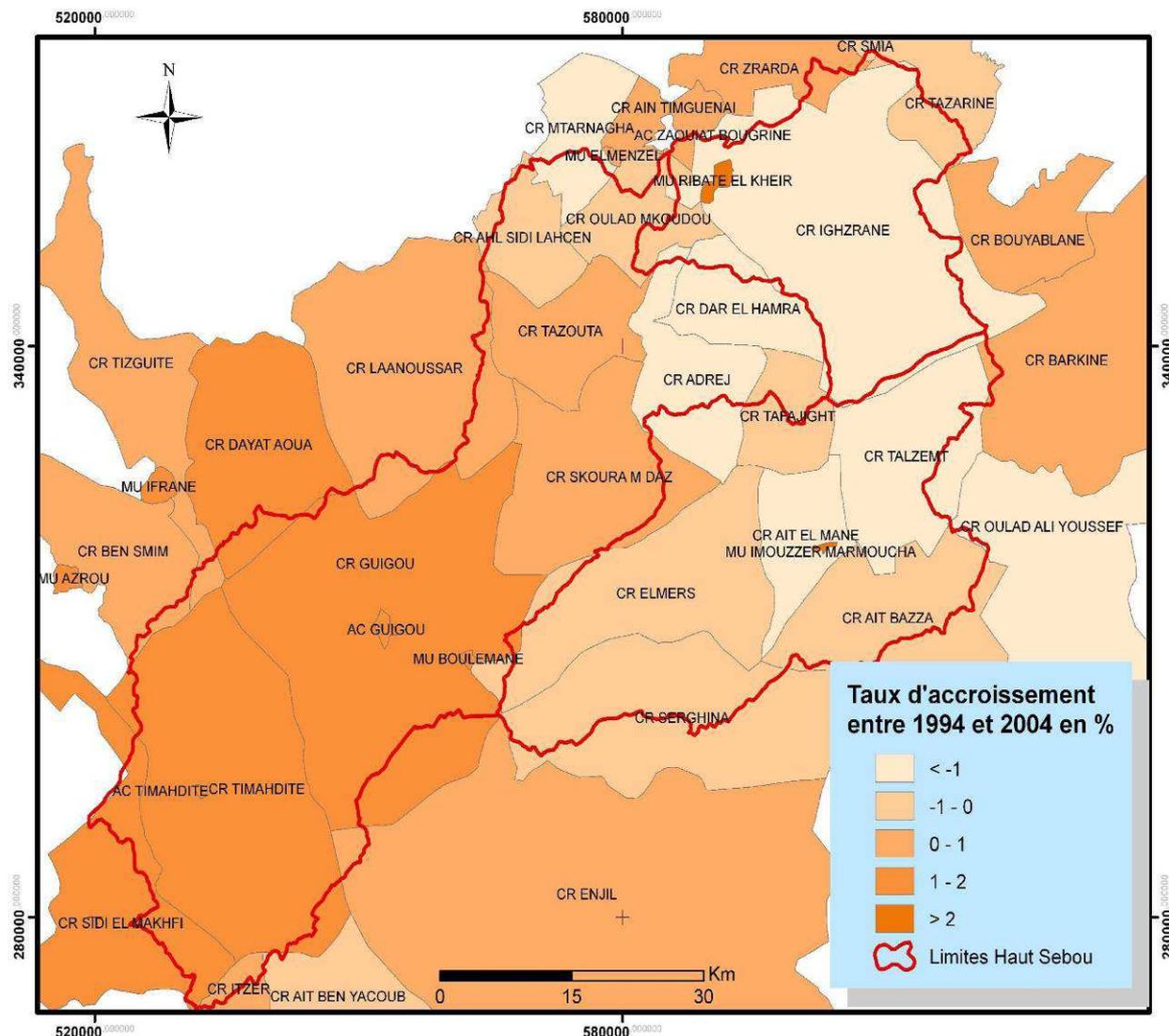


Figure 7. 3 : Carte du taux d'accroissement annuel moyen de la population des communes situées dans le Haut Sebou et des communes limitrophes (RGPH : 1994, 2004).

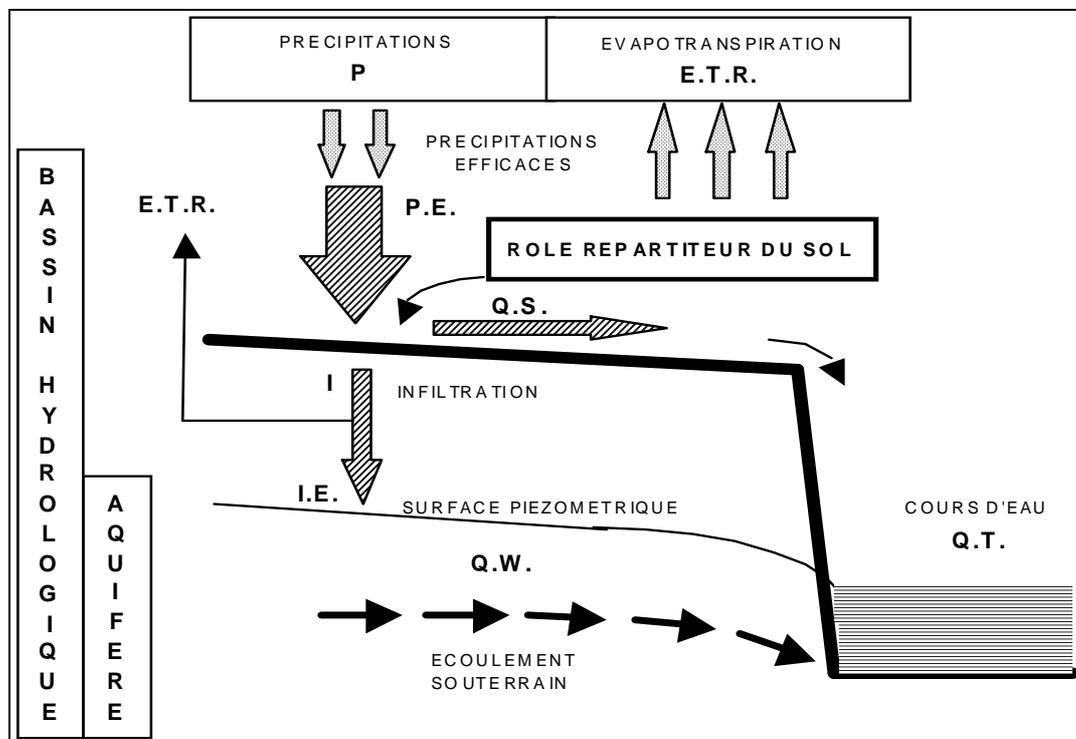


III- L'occupation des sols

Les quantités de précipitations, qui conditionnent la ressource en eau d'un bassin versant, sont redistribuées à la surface du sol en fonction des propriétés à la fois des sols et des couverts végétaux. Dans le bassin du Haut Sebou davantage que la nature du sol c'est son occupation qui est déterminante de point de vue du bilan de l'eau. En effet elle détermine notamment les montants de l'évapotranspiration qui sont forts différents entre agriculture irriguée et agriculture bour ou végétations naturelles mais également les espaces à partir desquels il y a prélèvement d'eau à partir du cours d'eau ou de la nappe. C'est à ce titre que l'occupation du sol est étudiée comme « pouvoir répartiteur » (fig.7.4) et comme moyen qualitatif d'évaluation de la pression humaine sur le bassin versant. Qui plus est, dans un cadre prospectif

l'occupation des terres est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (Foody, 2002).

Figure 7.4 : Le pouvoir répartiteur du sol (Castany ; 1982).



Elle a fait l'objet d'une cartographie synthétique (fig.7.5) selon 7 types de surface à partir des documents suivants : les cartes topographiques au 1/25000 de la zone, une image du logiciel Google Earth, géoréférencée (date d'acquisition : avril 2012), les données provenant du service d'aménagements des forêts et du bassins-versants du Moyen-Atlas (C.R.E.E.A, Fès) contenu dans le rapport d'étude de l'aménagement du barrage Allal El Fassi ainsi que les enquêtes menées sur le terrain.

Figure 7.5 : Carte d'occupation des sols.

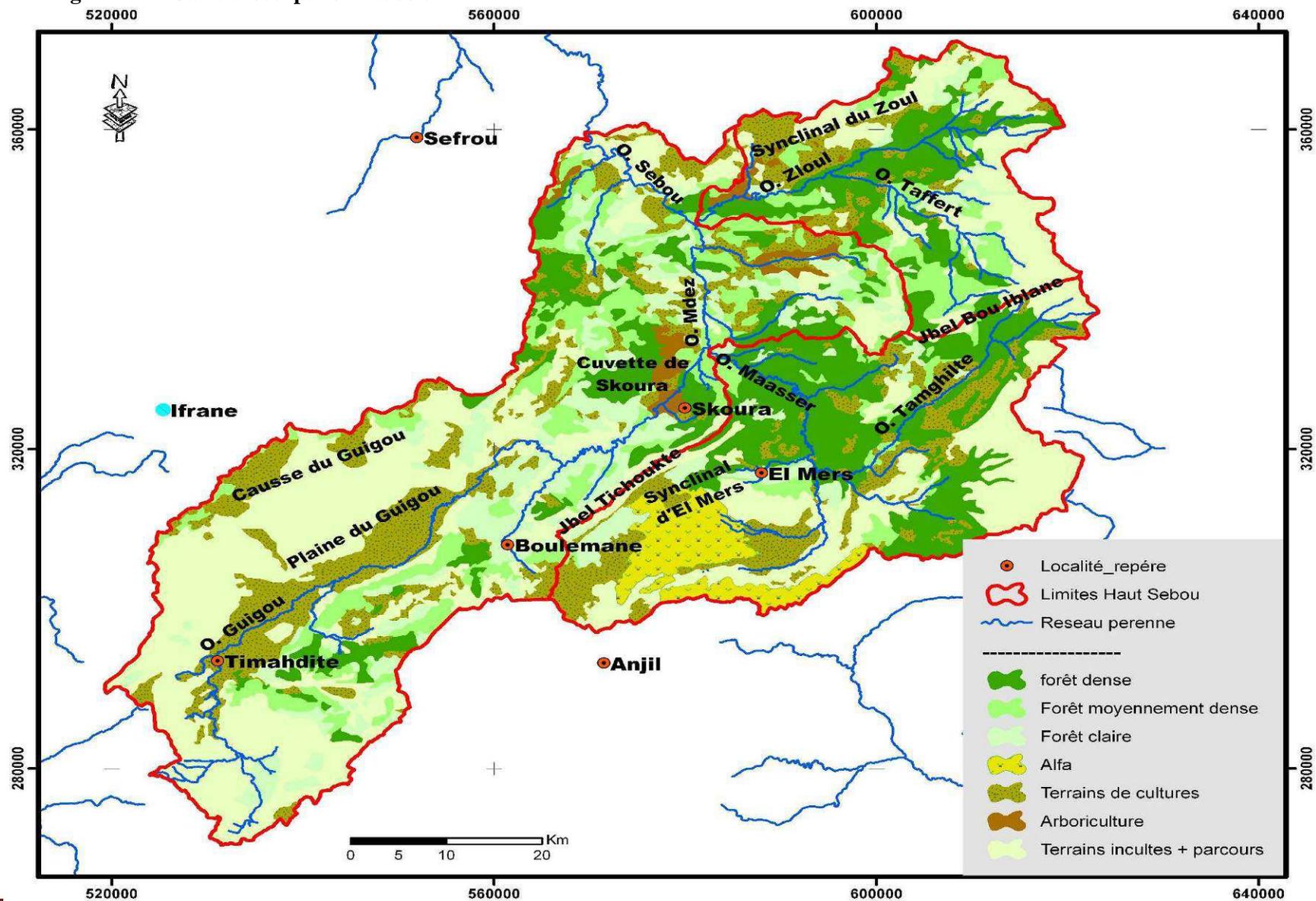


Figure 7. 6 : Répartition des différentes variables d'occupation du sol.

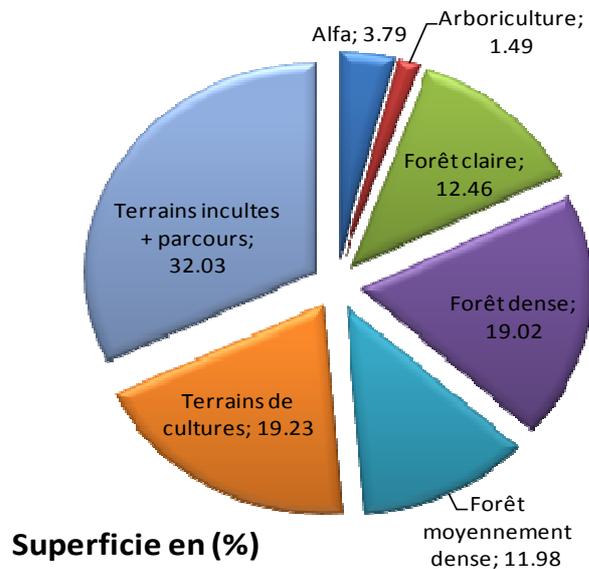
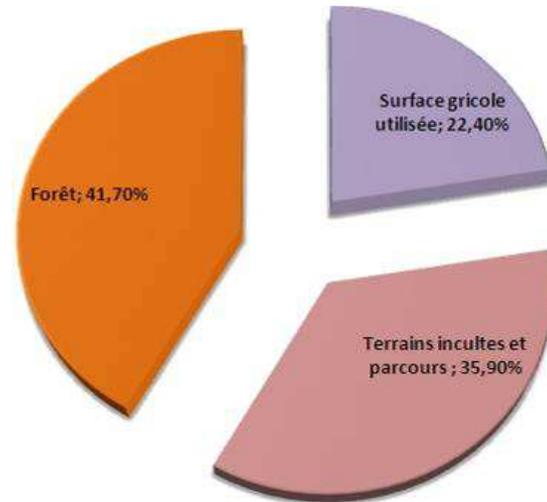


Figure 7. 7 : Répartition du territoire entre différents usages.



Les forêts occupent la majeure partie du bassin (forêt dense 19 %, forêt claire 12%, forêt moyennement dense 19% et l'alfa 3, 7%). Suivies par les terrains incultes et parcours soit 19,3%. Les terrains de cultures et d'arboricultures représentent 22%.

Pour passer à une analyse simplifiée de l'occupation du sol, les 7 classes ont été regroupées en 3 classes pertinentes du point de vue hydrologique : terrains de cultures, terrains incultes et parcours, et forêt.

Le milieu montagnard est un espace qui impose certaines limites à l'occupation humaine. Les altitudes élevées, le volume montagneux, l'ampleur des dénivellations représentent des obstacles à l'occupation permanente du sol au-dessus de 1900-2000m d'altitude (Jennan, 2004). En revanche, la sagesse cumulée chez l'homme montagnard lui permet de diversifier les activités et de s'adapter aux différentes conditions caractérisant le milieu, en essayant de surmonter les handicaps d'une part, et en profitant des atouts d'autre part. Dans le Haut Sebou, bien que la surface agricole utilisée soit peu importante, il apparaît que la population locale exploite bien cet espace, car les cuvettes et les plaines sont utilisées à l'agriculture, et les piedmonts et les causses sont utilisés comme des parcours. Tandis que les montagnes sont dominées par la forêt.

1- Les terrains de cultures

Les surfaces agricoles utilisées dans le Haut Sebou n'occupent que 22 % de la superficie du bassin versant, mais cela est deux fois supérieures à la moyenne de la totalité du Moyen-Atlas, 10 % (Nejjari, 2002). (Les terrains de cultures, se répartissent en trois types : la culture irriguée, la culture bour, et l'arboriculture. Ces activités agricoles dépendent de plusieurs conditions, entre autres, les fluctuations climatiques, l'abondance des ressources en eau, le sol, la topographie... ce qui entraîne une forte hétérogénéité spatiale et une discontinuité dans l'occupation du sol.

En amont du bassin, l'agriculture profite de conditions favorables. C'est la plaine du Guigou où les communes de Timahdite et de Guigou recèlent la surface agricole utilisée la plus étendue du bassin, près de 32 000 ha. (23 415 ha en bour et 8 253 ha en irrigué, soit 23% de la surface totale, (Nejjari, 2002). Les cultures irriguées dans ces plaines bénéficient de la présence de sources importantes (Aïn Aberchane, et Aïn Tit Zil). Bien que les conditions climatiques ne soit pas favorable à l'arboriculture, on a constaté depuis peu l'apparition de quelques parcelles dans la région de Timahdite. Ceci est la conséquence d'une politique incitative de l'état, sous formes d'aides financières pour encourager les agriculteurs à remplacer les cultures existantes par des plantations moins consommatrices en eau.

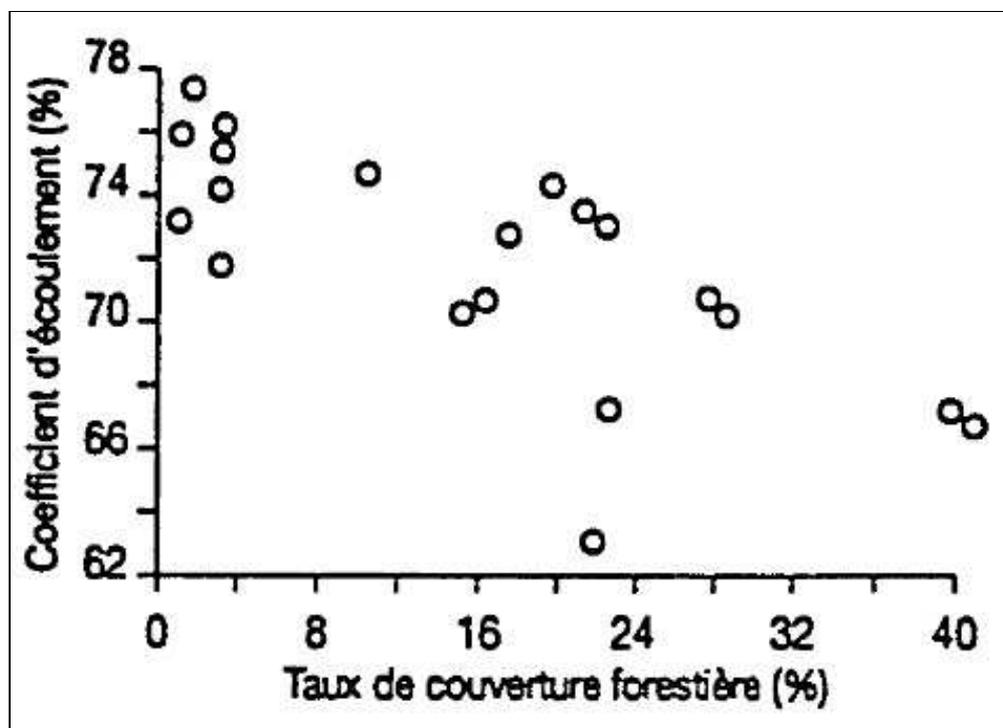
Au centre du bassin, ce sont plutôt les surfaces en cultures en bour (9074 ha) qui sont supérieures aux surfaces en culture irriguée (1462 ha). Cela s'explique par les conditions climatiques sévères et les faibles ressources en eau de surface. Dans la région d'Immouzar Marmoucha, la présence d'une source importante améliore les conditions pour une arboriculture. C'est également le cas pour la région de Skoura (1500 ha d'olivier alors qu'El Mers n'en possède que 220 ha). La cuvette de Skoura a par ailleurs fait l'objet, au début des années 50, d'un aménagement de moyenne hydraulique (2.055 ha). Mais malgré l'importance des études et des travaux menés ; l'essentiel du périmètre offre aujourd'hui un aspect désolant : sols nus livrés à l'érosion, réseaux de canaux abandonnés ou détruits... (Tag et Loew 2000). L'échec de ce projet est lié aux litiges entre les différents usagers de l'eau.

Enfin, la partie aval du bassin, offre 15 % de surface agricole utilisée, notamment, dans la commune d'Ighzrane dans le bassin du Zloul, mais sa mise en valeur est très faible, la culture profite des espaces cultivables assez importants et de conditions climatiques moins sévères.

2- La végétation naturelle

Avant d'aborder l'extension de la forêt comme une composante importante de l'occupation du sol dans le Haut Sebou, rappelons le rôle que joue le couvert végétal sur le cycle de l'eau. Selon de nombreux auteurs, l'interception de la pluie par le couvert végétal pourrait provoquer un accroissement de l'évapotranspiration (Martin et al., 2003). Cosandey (1995) a montré la relation entre l'accroissement de l'écoulement et le taux de boisement (fig.7.8), Bien que difficilement quantifiables, les effets de la végétation sur le comportement hydrologique sont un fait et vont de le sens de la régulation de l'écoulement dans les bassins (Taous, 2005). La végétation influence donc le taux d'évaporation, la capacité de rétention du bassin, et la vitesse de l'écoulement superficiel. Dans le même ordre d'idées, Tayebi (2006) écrit que la couverture végétale, surtout forestière, crée une véritable zone « tampon » entre les actions externes et le sol sous-jacent. Le couvert végétal est considéré comme une couche intermédiaire entre la surface du sol qu'elle enveloppe et l'atmosphère : Comme dit (Scaetta et al., 1937) « cette couche (couverture végétale) agit par rapport au sol comme amortisseur dont l'existence ou la disparition sont de nature à influencer directement l'action du climat atmosphérique sur le sol ».

Figure 7.8 : Relation entre le coefficient d'écoulement et le taux de couvert forestier, d'après Mad'ud (1992) in Consandey (1999).



Comme nous l'avons dit plus haut, dans le Haut Sebou les forêts occupent la majeure partie du bassin, soit 42% de la superficie totale. Cette dominance s'explique par la diversité des

paysages bioclimatiques favorisés par les facteurs suivants : l'exposition des versants, la diversité du substrat et de la lithologie, les conditions anthropiques etc. Ces facteurs cités commandent la densité, le type et la répartition des formations végétales, comme le montrent la carte (fig.7.9) et les photos (planche photos 8.1).

A cet égard, en se basant sur les conditions climatiques, les conditions édaphiques et l'action de l'homme, Jennan (2004) a distingué trois grands ensembles biogéographiques dans le Moyen-Atlas :

- Le premier ensemble correspond aux forêts denses et matorrals des causses et de la façade occidentale du Moyen-Atlas central.
- Le deuxième ensemble est le domaine des forêts claires, des matorrals et des steppes ligneuses. Il s'étend sur le Moyen-Atlas plissé et ses piémonts moulouyens ainsi que sur les cuvettes arides du Nord-Est : cuvette de Skoura, vallée du Guigou-Mdez et Sebou.
- Le troisième ensemble correspond aux forêts claires, et formations dégradées de l'Azarhar où le facteur anthropique semble avoir joué un rôle décisif dans la dégradation du couvert végétal.

En termes de répartition des formations arbustives, on trouve essentiellement du cèdre et du chêne vert sur les causses d'Elhajeb, Ifrane, Sefrou, Marmoucha et sur une partie des hautes montagnes du Moyen-Atlas plissé. Sur les versants les moins exposés à l'humidité, se trouvent des formations dégradées et moins denses (matorrals) : Il s'agit essentiellement du thuya, du genévrier, du chêne vert et du chêne kermès, qui se répartissent dans les dépressions de Skoura, du Zloul et d'El Mers (Obda, 2004).

Les steppes d'Alfa, de faible extension, ne se trouvent que dans le bassin de Serghina au contact avec le bassin du Moulouya. Ces formations s'adaptent à des conditions climatiques plus arides.

Figure 7.9 : Groupement végétaux dans le bassin du Haut Sebou.

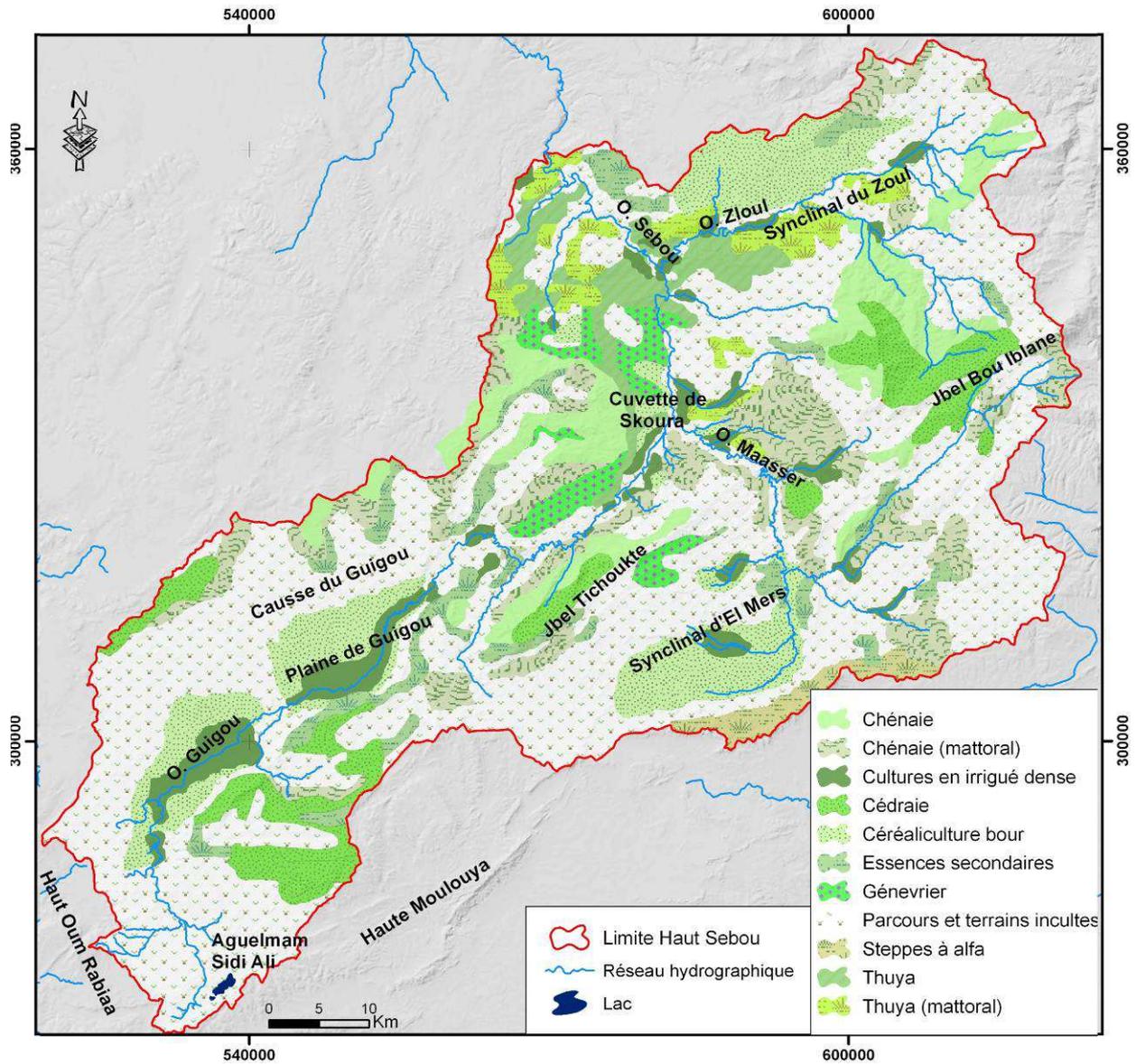


Planche photos 8.1 : Forêt dense de chêne dans le bassin de Taffert dans le Moyen-Atlas plissé



Photo 7.1 : Cèdre dégradé à Tighboula (Boulemane).

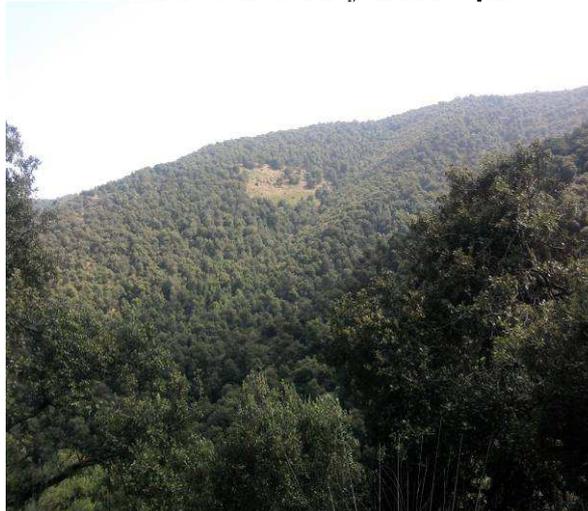


Photo 7.2 : Les steppes d'alfa dans la plaine de Serghina.



Photo 7.3 : Chênaie peu dense à Maâsser.

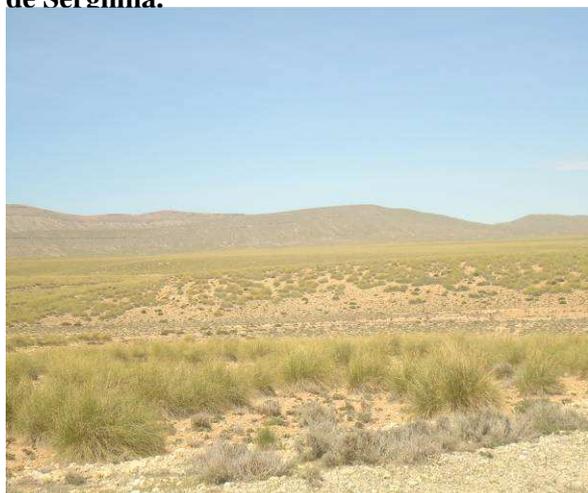


Photo 7.4 : Cèdre dégradé cernant Aguelmam S. Ali



3- Les terrains incultes et les parcours

Malgré l'évolution marquée du point de vue de l'utilisation de l'espace et des activités exercées par la population, le Moyen-Atlas est toujours considéré comme une terre d'élevage

du fait des conditions climatiques et des potentialités du milieu, où la population s'adonne au semi-nomadisme et à la transhumance (Jennan, 2004).

Photo 7.5 : Thua claire au bassin de Mdez.



Photo 7.6 : Mattoral.



Il est évident que parmi les caractéristiques des zones montagnardes, l'élevage est l'élément axial de l'économie, par rapport aux autres activités. Dans le Haut Sebou, cette activité bénéficie des terrains incultes et des parcours qui représentent plus de 35% de la superficie total du bassin du Haut Sebou. Plusieurs conditions naturelles et anthropiques contribuent à l'extension de ces terrains. Il s'agit essentiellement des facteurs suivants : le déficit et l'irrégularité pluviométrique, l'exploitation illégale des forêts (le bois), le surpâturage provoqué par le bétail, ce dernier constitue une source essentiel des revenus pour l'homme montagnard. Il est à noter que les parcours font l'objet de temps en temps des conflits entre tribus, parfois dramatiques. On cite l'exemple du conflit déclenché le 14 août 2014 entre les Aïte Telt et les Aïte Hassan dans la région de Guigou, qui a causé neuf blessés. Cela traduit bien la pression humaine existante sur le milieu.

Planche photos 7.2 : Parcours/pâturages dans la cuvette de Serghina et la région de Timahdite.



Conclusion du chapitre 7

L'étude du facteur anthropique a mis en évidence la croissance démographique et le processus de l'installation humaine dans le bassin du Haut Sebou. Ce processus est accompagné par des mutations au niveau des activités exercées et des modes d'occupation de l'espace. Ce territoire a connu une intensification rapide au niveau de l'exploitation agricole. Les besoins en eau de l'agriculture et des villages ne cessent d'augmenter surtout en période de basses eaux. Ces pratiques ont une influence directe ou indirecte sur le milieu physique, et plus particulièrement, sur les ressources en eau.

Par ailleurs, ce chapitre a permis de mettre l'accent sur les principales variables de l'occupation du sol, afin d'illustrer la pression sur les ressources naturelles, entre autres les ressources en eau. Ce constat induit une pression alarmante sur ressources en eau superficielles et souterraines.

****Chapitre 8 : L'irrigation au Maroc et dans le Moyen Atlas, historique de la gestion**

Sommaire

I-Historique de la politique d'irrigation marocaine

1-Evolution de la politique d'irrigation durant la période du protectorat

2-Evolution de la politique d'irrigation après l'indépendance

3-Le Plan Maroc Vert

3-1- Place de l'irrigation dans la stratégie du Plan Maroc Vert (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2008)

3-2 Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI), (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2008)

4- L'irrigation au Moyen-Atlas

4-1- Le cas du périmètre de Skoura

5- Le cadre institutionnel de la gestion de l'eau au Maroc

5-1 Historique des textes relatifs à la gestion de l'eau

5-2 La loi sur l'eau (loi n° 10-95)

5-3 Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC)

II- Les mutations récentes au sein de la région d'étude

1-Mutations générales

1-1 Le système foncier

1-2 L'élevage

1-3 Les dynamiques agraires

III- L'évolution de l'utilisation agricole dans le Haut Sebou

1-Le système d'irrigation

IV- La structure du réseau d'irrigation

1-1 Les seguias

1-2 Les barrages

2- Périmètres irrigués

2-1 Périmètre de Guigou-Timahdite

2-2 Périmètres de Skoura et d'Immouzar Marmoucha

3- Le fonctionnement d'irrigation traditionnel

Introduction du chapitre 8

Vers 5000 ans avant J C, l'Homme, pour ne plus dépendre de la nature, a inventé l'irrigation pour sécuriser son alimentation ainsi que celle de son bétail (Ouhssain, 2003). Au Maroc l'irrigation fait partie de choix stratégiques de l'état pendant le protectorat ou après l'indépendance. L'objectif de ce chapitre, dans un premier temps, est la mise en évidence de la politique d'irrigation du Maroc et son application dans le Moyen Atlas. Dans un second temps, il discute les mutations récentes au sein du bassin puis la structure et le fonctionnement du réseau traditionnel.

I- Historique de la politique d'irrigation marocaine

La réflexion sur la politique de la gestion de l'eau d'irrigation au Maroc ne peut être isolée de la réflexion plus globale des politiques de développement agricole et rural, de mobilisation et de gestion des ressources en eau et d'aménagement du territoire (Yacoubi Soussane, 2003).

En outre, la politique de l'eau d'irrigation au Maroc a été, pendant longtemps, assimilée à la politique des barrages. L'acte de stocker l'eau dans des barrages transforme « l'eau du ciel » en une « eau de l'Etat » (Pascon, 1978) et pourvoit les pouvoirs publics d'un redoutable outil de gouvernance. Car, « au Maroc gouverner c'est pleuvoir », selon la boutade très galvaudée du maréchal Lyautey, mais qui demeure d'une actualité brûlante de ce lien très fort entre eau et politique. Mais avant d'aborder la politique contemporaine de l'irrigation, il est utile de rappeler l'évolution que connaît l'irrigation au Maroc.

1- Evolution de la politique d'irrigation durant la période du protectorat

Au Maroc, l'irrigation est très ancienne. Elle est considérée depuis toujours comme une technique incontournable pour la lutte contre l'aridité et les vicissitudes du climat. En effet cette technique a été bien développée dans les anciennes zones de sédentarisation, avec l'utilisation de techniques souvent simples mais gérées par des organisations sociales très élaborées. Avant 1930, comme le rapporte (Boutayeb, 1998. In Bekkari, 2009) les équipements hydrauliques était en grande partie une œuvre des populations locales comme la réalisation des Seguias, l'aménagement des sources et Khattara, ainsi que la réalisation des ouvrages de prises d'eau sur les oueds Ces pratiques sont le fruit d'accumulation d'héritages depuis les romains dans le domaine de l'agriculture.

Vers la fin des années 1920, le Maroc a connu un essor de la grande irrigation comme résultat de la politique agricole coloniale. En effet, comme le souligne Pérennes (1993), l'ère coloniale va représenter une rupture dans la manière de concevoir les aménagements hydrauliques. Durant cette période, les agrumes et maraichages ont revêtu une importance particulière. Ce revirement a conduit à un développement rapide de l'irrigation à grande échelle comme le souligne Bekkari (2009). Néanmoins, pendant la colonisation française, l'aménagement et l'exploitation des ressources en eau ont connu des interventions massives des pouvoirs publics. En effet, le protectorat français a très tôt compris l'importance de l'irrigation en abandonnant sa politique du blé au Maroc, cet ancien « grenier de Rome », en faveur d'une agriculture irriguée sur le modèle californien et destiné en partie à l'exportation des agrumes (Swearingen, 1987, in Kadiri, 2013). L'année 1929 a connu la mise en service du premier grand barrage (Sidi Maâchou) sur l'Oued Oum Er Rabiaa. Il y a lieu de faire remarquer en effet qu'avant l'instauration de cet ouvrage hydraulique, l'essentiel du potentiel hydraulique du Maroc était donné en offrande à la mer. Entre 1929-1956, 14 barrages ont été construits qui, déjà, stockaient 1.920.000 mètres cubes et irriguaient 212.450 hectares. Swearingen (1987) verra dans cette politique de l'eau « l'exécution contemporaine d'une vision coloniale du développement, et l'accomplissement d'une destinée tracée par les auteurs de la politique coloniale française pendant les années trente et quarante », notamment dans des périmètres irrigués assez différents comme le Tadla, le Gharb et le Haouz (Préfol, 1986 ; Pascon, 1983).

2- Evolution de la politique d'irrigation après l'indépendance

Au lendemain de l'indépendance, l'irrigation a constitué une voie privilégiée du développement agricole et a bénéficié d'une attention particulière des pouvoirs publics. Plusieurs considérations ont motivé cette nouvelle orientation (la lutte contre la pauvreté, la limitation de l'exode rural...). A cet égard le Maroc a approuvé de grands efforts dans le domaine de la maîtrise de l'eau et le développement de l'irrigation, qui restait au cœur de sa politique agricole (Jouve, 2002). En effet, cette période est marquée par la création de l'Office National d'Irrigation (ONI) qui est remplacé par l'Office de Mise en Valeur Agricole (OMVA) en 1965.

Par ailleurs, la priorité donnée à l'hydraulique se reflète dans le discours du Roi en 1967, qui fera de l'irrigation d'un million d'hectares un projet de règne : « Nous avons lancé un défi au temps et à nous-mêmes et avons décidé de réaliser le million d'hectares irrigués », devait-il

rappeler en 1974 au moment de l'inauguration du barrage de l'Oued Makhazine, dixième grand barrage du Maroc. Le dit objectif symbolise le choix stratégique de l'irrigation comme option constante de la politique de développement agricole (Taibi, 2012 ; Bamoye, 2007). Cette priorité se reflète aussi dans la part massive des investissements en hydraulique agricole (plusieurs centaines de millions de dollars par an à partir des années 70) au sein des investissements consacrés au secteur de l'agriculture (Jouve, 2006 ; Akesbi, 2006 ; Agoumi et Debbarh, 2006. In Dahou et al., 2011). En général, il s'agit d'une politique d'irrigation ambitieuse qui se proposait de relever deux défis majeur d'après (Jouve, 2002) :

- Assurer la sécurité alimentaire d'une population en croissance très rapide.
- Intensifier l'agriculture, secteur prioritaire dans tous les plans de développement, en levant la contrainte primordiale de la pluviométrie, trop faible et trop irrégulière.

Rappelons que pour atteindre le million d'hectares irrigués, l'effort a porté aussi bien sur l'extension de l'irrigation que sur la modernisation et la réhabilitation des périmètres traditionnels existants. Au niveau des aménagements, les politiques agricoles ont donné la priorité aux plaines riches par rapport aux régions moins favorables comme les zones montagnardes.

Tableau 8.1 : Superficies irrigables et équipées dans la zone d'action des Offices de mise en valeur agricole marocains. Source : Administration du Génie Rural in Jouve, 2002.

ORMVA	Superficies irrigables (ha)	Superficies équipées (ha)
Doukkala	133 600	104 600
Gharb	222 500	106 400
Haouz	189 900	142 600
Loukkos	33 700	26 400
Moulouya	77 300	77 300
Ouarzazate	37 600	37 600
Souss-Massa	39 900	39 900
Tadla	117 800	109 000
Tafilalet	27 900	27 900
TOTAL	880 200	671 700

En outre, les efforts menés en matière de constructions de barrages et d'équipement des périmètres irrigués ont connu des rythmes soutenus : un barrage par an sur les trente dernières

années ; 15 000 ha supplémentaires équipés par an en moyenne (24 000 ha pendant la décennie 70). Ces efforts déployés en matière de réalisation d'infrastructures hydrauliques permettent de disposer à l'heure actuelle, en année moyenne, de 10,8 milliards de m³ dont 7,3 milliards m³ proviennent de la mobilisation des eaux superficielles et 3,5 milliards de m³ d'eaux souterraines (Yacoubi, 1999). C'est l'agriculture qui consomme la plus grande part des eaux mobilisées (Tab. 8.2)

Tableau 8.2 : Evolution des volumes d'eau mobilisables par l'agriculture en % à l'échelle nationale. (Agoumi et Debbarh, 2005).

Année	1999	2000	2020
Part de l'irrigation	92%	85%	81%

En ce qui concerne les réalisations, Laouina (2007) souligne le décalage persistant entre les superficies dominées par les barrages (surfaces irrigables) et celles qui ont été équipées et donc effectivement irriguées.

Il convient de noter que cette politique ambitieuse a induit une forte intensification de l'agriculture et un net enrichissement des agriculteurs dans les périmètres irrigués depuis cinquante ans. Cependant, la production agricole a augmenté à un rythme de près de 8% par an depuis 1960 comme le souligne Jouve (2002).

3- Le Plan Maroc Vert

Compte tenu de l'importance de l'agriculture dans le tissu économique du pays, de 15 % à 20 % du PIB national et 4 % des exportations, le Maroc a adopté en avril 2008 une nouvelle stratégie pour le développement de l'agriculture : c'est le «Plan Maroc Vert». Du point de vue social, il supporte une charge importante. En effet, l'agriculture est une source d'emploi majeure avec 3 à 4 millions d'actifs ruraux travaillant dans le secteur et 60 000 à 100 000 emplois dans l'agroalimentaire. Ce domaine a une contribution décisive aux grands équilibres macroéconomiques et à la balance commerciale du pays (Taibi, 2012).

Cette stratégie vise deux objectifs. Il s'agit d'une part de faire de l'agriculture un moteur de la croissance de l'économie nationale par le développement d'une agriculture à haute valeur ajoutée et à haute productivité. D'autre part l'ambition est également de mettre à niveau une agriculture sociale et solidaire pour lutter contre la pauvreté et d'adopter des mesures transverses afin de lever les contraintes au développement de l'agriculture, notamment les contraintes liées au foncier et à l'eau.

3-1- Place de l'irrigation dans la stratégie du Plan Maroc Vert (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2008).

Ce plan ambitieux a pris en considération la raréfaction croissante des ressources en eau accentuée par les changements climatiques. Pour faire face à cette contrainte le Plan Maroc Vert et la Stratégie nationale du secteur de l'eau ont adopté un Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI).

Rappelons toutefois que la Stratégie nationale du secteur de l'eau a été élaborée pour l'économie d'eau et sa valorisation en agriculture irriguée. Cette stratégie considère l'amélioration du revenu agricole comme une condition pour sa réussite.

Comme l'explique une note du ministère de l'agriculture, ladite stratégie se base sur :

- ✓ L'amélioration du service de l'eau d'irrigation, le renforcement et l'adaptation du système de financement et d'incitation à l'économie d'eau.
- ✓ L'amélioration de service agricole sous tous ses aspects (organisation, partenariat, contrats de cultures, etc.).
- ✓ Le développement d'un conseil de proximité en matière de conception des systèmes d'irrigation économes d'eau et d'appui à l'amélioration de la productivité.

3-2 Programme National d'Economie d'Eau en Irrigation (PNEEI), (Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2008)

Ledit programme s'inscrit dans les mesures transverses du Plan Maroc Vert. Il vise en effet à atténuer la contrainte hydrique, considérée comme le principal facteur limitant à l'amélioration de la productivité agricole. D'après le ministère de l'agriculture ce programme consiste en une conversion massive de l'irrigation de surface et par aspersion à l'irrigation localisée, sur une superficie de près de 550.000 ha pendant une période de 10 ans, soit un rythme d'équipement moyen de près de 55.000 ha/an. On résume ses objectifs dans les points suivants :

- La valorisation des ressources en eau mobilisées par les barrages à travers la résorption du décalage entre les superficies dominées par les barrages réalisés et les superficies équipées qui s'établit à 108 440 ha. Ce gap d'équipement est principalement situé dans le bassin du Sebou.
- Le renforcement de la maintenance et de la réhabilitation des réseaux d'irrigation des périmètres collectifs pour assurer un meilleur service de l'eau et la pérennité des équipements.
- La réforme institutionnelle du secteur de l'irrigation, notamment de la grande irrigation, afin d'améliorer sa compétitivité et ses performances et de valoriser au mieux l'eau, et ce à

travers l'encouragement de partenariat public-privé pour la gestion des périmètres collectifs d'irrigation.

□ La poursuite des efforts visant la promotion de la gestion participative de l'irrigation, notamment dans les périmètres de PMH, pour impliquer et responsabiliser les usagers dans la gestion des réseaux d'irrigation et la valorisation de l'eau.

4- L'irrigation au Moyen-Atlas

Durant la période coloniale, les montagnes n'avaient guère été favorisées par le protectorat par rapport aux plaines, car considérées comme faisant partie du Maroc "inutile" (El Jihad, 2001). Par la suite les zones montagnardes n'ont pas bénéficié des efforts de l'état en matière des aménagements hydraulique. Il est utile de signaler ici que la politique de l'état s'est focalisée sur deux types d'irrigation: la grande hydraulique, et la petite et moyenne hydraulique.

Dans le Moyen-Atlas les périmètres d'irrigation de taille petite à moyenne représentent une proportion plus importante que dans les autres régions du Maroc. Rappelons que du point de vue des aménagements l'état distingue la grande hydraulique de la Petite et Moyenne Hydraulique (PMH). Cette dernière désigne des périmètres irrigués traditionnels de taille faible (inférieure à 100 ha), à moyenne (dépassant rarement 3.000 ha à 5.000 ha (Laith, 2008). Ces périmètres sont gérés de façon collective par les usagers (Hilali, 2004).

Ces zones, souvent caractérisées par l'éclatement et la dispersion de la propriété n'ont pas inclus été fait partie des priorités dans la politique d'aménagement hydraulique par rapport aux périmètres qui offrent de grandes surfaces agricoles. Cette politique sélective de zoning a marginalisé les territoires non productifs comme les zones montagnardes.

Ceci explique que bien que richement doté en eau, le Moyen-Atlas n'a que peu d'infrastructures de stockage (Bekkari, 2009). Les ouvrages de retenue sont rares ou de taille réduite et ont souvent comme fonction de régulariser le débit ou de fournir de l'eau potable. La majorité des ouvrages n'ont qu'une importance locale, comme le barrage d'Enjil qui dessert un périmètre réduit d'environ 1500 ha (Bekkari, 2009).

Dernièrement, au niveau de la commune rurale de Guigou; l'état a terminé la réalisation du barrage Sehb El Merga. Ce barrage, d'une capacité de retenue de 7 millions m³ et d'une superficie de 80 ha, est destiné à la protection du centre de Guigou contre les crues, l'irrigation des périmètres agricoles en aval et l'alimentation en eau potable des populations de la région.

Planche photos 8.1 : Barrage Sehb El Merga.



Actuellement, un ambitieux projet est en train de sortir de terre en aval du Haut Sebou ; Il s'agit du barrage Mdez d'un volume de 125 Mm³/an (ABHS, 2006) mais qui a vocation à desservir les périmètres en aval de notre bassin d'étude.

Bien que le massif n'ait pas bénéficié des grands programmes hydrauliques de l'état, son irrigation y est très ancienne. Elle est cependant d'une importance relative car historiquement et encore aujourd'hui, l'activité agricole dans le Moyen-Atlas donne la priorité à l'élevage par rapport aux cultures. En effet, l'élevage représente toujours un potentiel de développement de tout premier plan en terme qualitatif, voire quantitatif (Potin, 2002).

Cet auteur a distingué deux catégories de périmètres d'irrigation :

- Les périmètres de sources, souvent de taille réduite et constituant la majeure partie des sites en zones montagnardes. On y pratique une irrigation en hiver sur la totalité des superficies mais au printemps et en été la surface est variable selon le débit disponible.
- Les périmètres d'oueds, caractéristiques de la majorité des sites en cuvette et de plaine. Souvent distribués le long du lit majeur on y pratique une irrigation tout au long de l'année selon le débit disponible et la température.

4-1- Le cas du périmètre de Skoura

Vers la fin des années 1950, les centres de mise en valeur agricoles (CMV) ont adopté l'aménagement de périmètres irrigués de taille moyenne pour intensifier l'agriculture indigène, face à la grande hydraulique des colons (Tag et Loew, 1998). Le périmètre de Skoura était parmi les premiers instaurés dans ce cadre et l'unique dans le Haut Sebou. La réalisation de ce périmètre, commencé sous le protectorat et terminé après l'indépendance a

couru sur 25 ans (1950_1974) et a constitué une superficie aménagée de 2055 ha dont 2015 ha irrigables à raison de 0,75 l/s par ha en théorie (Jennan, 1986).



Photo 8.1 : Seguia édifiée dans les années 1950 par la population locale.

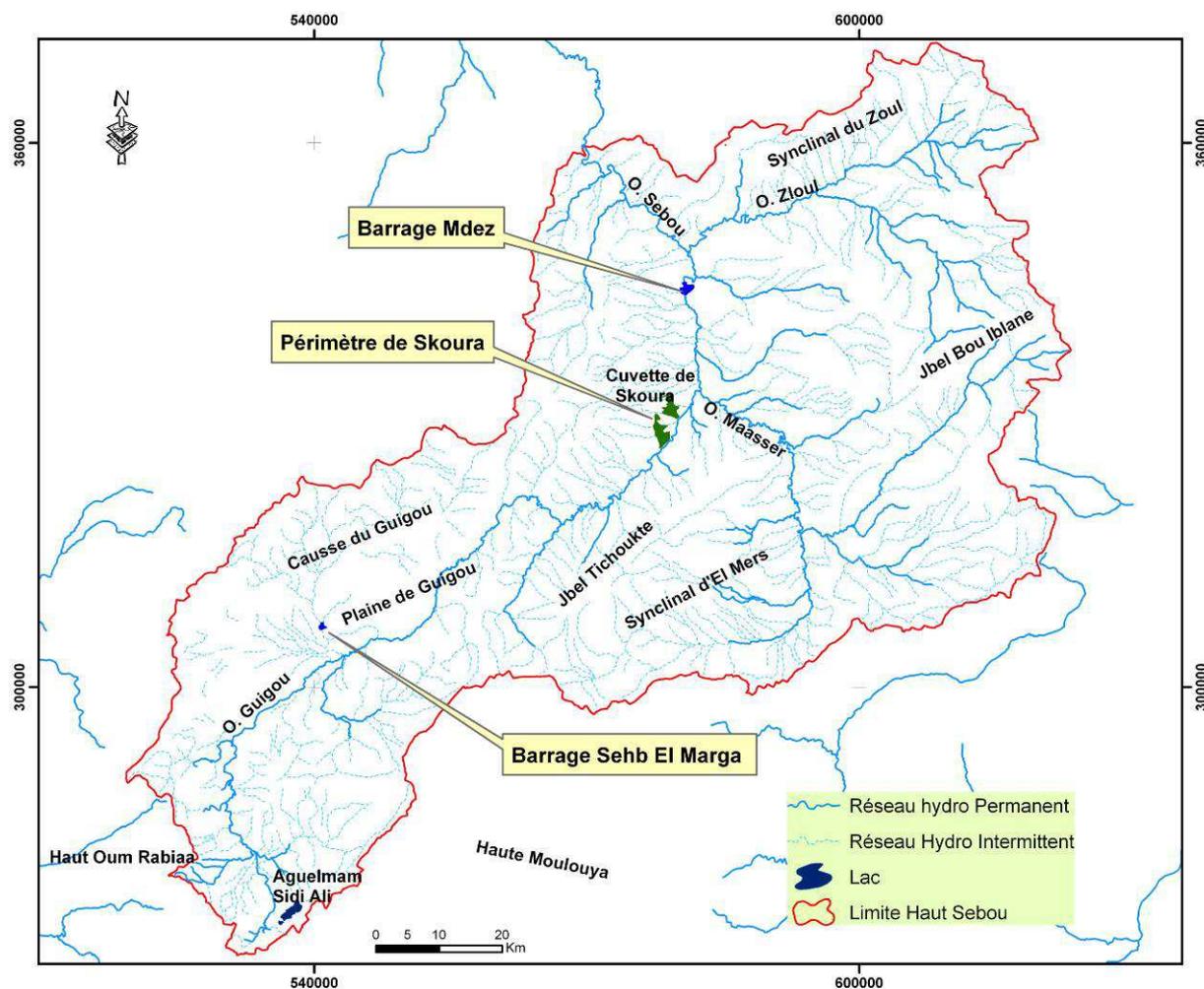
Le travail d'inventaire de Tag et Loew (1998), ainsi que le diagnostic du terrain que nous avons effectué montrent un paysage caractérisé par des sols nus livrés à l'érosion, et des réseaux de canaux abandonnés ou détruits témoignant de l'abandon d'un aménagement de type moyen hydraulique.

Tag et Loew (1998) expliquent cet échec par l'absence d'une approche participative. En effet faute d'explication les populations locales n'ont pas accepté la transformation de pâturages collectifs en lots privés. Des conflits entre les fractions de tribus sur les limites territoriales dans la cuvette ont donc éclaté ce qui a conduit l'échec du projet. Ce dysfonctionnement illustre la primauté des terres sur les eaux.

Planche photos 8.2: Equipements hydrauliques abandonnés.



Figure 8.1 : Situation des barrages et le périmètre de Skoura.



5- Le cadre institutionnel de la gestion de l'eau au Maroc

Kadiri (2013) souligne que l'objectif du million d'hectares à l'horizon 2000 fut consolidé par des investissements conséquents pour la construction d'un grand barrage par an et la mise en place d'un important dispositif administratif et institutionnel ainsi que la promulgation de textes législatifs applicables à l'eau d'irrigation.

La loi sur l'eau, qui constitue la base légale actuelle de la politique de l'eau du pays, fixe un ensemble d'objectifs dont les plus marquants sont :

- une gestion rationnelle de toutes les ressources en eau,
 - une protection et une conservation quantitative et qualitative du domaine public hydraulique
- une planification cohérente et souple de l'utilisation des ressources en eau
- une gestion des ressources en eau dans le cadre d'une unité géographique (le bassin hydraulique)

La présentation historique des textes juridiques qui suit a pour but de mettre en lumière l'évolution législative relative à la gestion de la ressource en eau au Maroc.

5-1 Historique des textes relatifs à la gestion de l'eau

Comme l'indique plusieurs chercheurs (El Jihad, 1982 ; Doukkali, 2005 ; Faruqui et al., 2001 ; Bazzna et De Meulemeester, 2009), la tradition de l'eau est ancestrale. En effet, des règles précises d'affectation de l'eau et une organisation de la police de l'eau existaient depuis des siècles et ont donné lieu à des recueils de textes coutumiers dit « Orf », droits assez exhaustifs, précis et dont l'intensité et la rigueur augmentent avec la rareté de l'eau.

Au Maroc, le premier texte se rapportant à l'eau date de 1914 soit deux ans seulement après l'instauration du protectorat français au Maroc. Il s'agit du dahir du 7 Chaâbane 1332 (1er juillet 1914) sur le domaine public qui sera complété par les dahirs de 1919 et 1925. Ils intègrent toutes les eaux, quelle que soit leur forme, au domaine public hydraulique. D'autres textes ont été élaborés par la suite comme le « code des eaux au Maroc » (Sonnier, 1935, in Tazi Sadeq, 2006) pour faire face aux nouveaux besoins.

En 1961 la législation sur l'eau comptait 10 dahirs, 4 arrêtés, une circulaire et une instruction (Ouhssain, 2003).

La sécheresse des années quatre vingt et son impact sur la gestion de l'eau, a conduit à la révision de ces textes (dahirs, arrêtés, codes) qui étaient devenus obsolètes.

L'état a donc lancé une longue et profonde réflexion qui a duré plus de 10 ans et a abouti à la promulgation de la Loi 10.95, adoptée par le législateur en 1995.

5-2 La loi sur l'eau (loi n° 10-95)

La loi 10-95 sur l'eau constitue une orientation pour le développement des ressources en eau au Maroc en même temps qu'un cadre général de gestion, de conservation et de protection tant quantitative que qualitative de la ressource en eau. Elle se compose de 13 chapitres et 123 articles qui spécifient :

- 1) l'eau comme une fortune publique, dont le droit à l'usage est accordé dans les conditions fixées par la présente loi.
- 2) l'obligation du ré-enregistrement du droit de l'utilisation de l'eau dans un délai de cinq ans après la promulgation de la loi sur l'eau et la définition de la succession et du transfert du droit de l'utilisation de l'eau
- 3) la conservation et la protection du domaine public hydraulique

- 4) la mise en place du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC) ainsi que le développement des ressources en eau et la gestion intégrée des ressources en eau par l'agence du bassin hydraulique (ABH) par bassin
- 5) le système d'approbation, les droits et les obligations concernant l'utilisation de domaines publics hydrauliques
- 6) la conservation de l'eau, la prévention de la pollution et les standards de la qualité de l'eau
- 7) l'alimentation en eau potable
- 8) l'eau naturelle et la vente de l'eau naturelle
- 9) l'utilisation et la gestion de l'eau pour l'agriculture, la prévention de la pollution de l'eau, la restriction de l'eau pour l'irrigation pendant la période de sécheresse
- 10) la restriction de l'utilisation d'eau pendant la période de sécheresse
- 11) la prévision de la demande en eau, le registre de l'eau, les mesures pour l'inondation, etc.
- 12) la mise en place du conseil de l'eau aux niveaux provincial, communal et municipal et la participation des habitants pour la conservation et la gestion de l'eau
- 13) le dévoilement des violations de la loi par la police de l'eau et les amendes et poursuites

Cette loi a donné la priorité à la gestion intégrée des ressources en eau avec la participation des usagers. Elle a introduit également la protection de la qualité de l'eau et de nouvelles priorités stratégiques.

Néanmoins, malgré le caractère global et actuel de cet arsenal de textes, elle est inefficace en matière de contraventions, du fait de l'absence de mécanismes de réglementation et de moyens efficaces pour les mises en pratique. Ce constat montre le dysfonctionnement et les limites de la gestion moderne des ressources en eau.

5-3- Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC)

Il s'agit d'une institution qui regroupe des représentants du gouvernement, des ABHs, de l'ONEP, et de l'ORMVA, des consommateurs élus, des membres du conseil provincial et des chercheurs, ainsi que les associations du domaine intéressés par les problèmes de l'eau. Il s'agit donc d'un cadre de réflexion et de concertation chargé de la définition des grandes

options nationales à moyen et long termes, de planification, de mobilisation, de gestion et de préservation des ressources en eau.

D'après la loi sur l'eau (loi n° 10-95), le Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (CSEC) doit donner les recommandations ci-après lors de l'élaboration des grandes lignes de la politique nationale concernant l'eau et le climat. Il examine et formule, en outre, son avis sur :

- La stratégie nationale pour l'amélioration des connaissances sur le climat et les impacts sur le développement des ressources en eau
- Le plan national du développement des ressources en eau
- Le plan de développement intégré des ressources en eau par bassin, en particulier, le plan de distribution de l'eau répondant à des demandes sectorielles et régionales, compte tenu du développement et de la conservation des ressources en eau.

II- Les mutations récentes au sein de la région d'étude

1-Mutations générales

A travers l'histoire, la diversité des ressources du Moyen-Atlas a offert des dynamiques de transformations importantes. Compte tenu de l'abondance de ses pâturages et de la diversité de ses climats, le Moyen-Atlas est considéré avant tout comme un territoire d'élevage (Jennan, 1986 ; Tag, 1996). Sur ce territoire le mode de vie est passé du semi-nomadisme à une sédentarisation progressive. Jennan (1986) relève que les campagnes du Moyen-Atlas évoluent en sous-espaces très variés, hétérogènes, sécrétant des mécanismes tant spécifiques que divers : espaces en mutation et espaces figés, espaces à dynamisme interne et espaces extravertis.... Le trait dominant de ces transformations est la désertion des espaces pastoraux au profit des vallées et des plaines riches en eau et en cultures. Par ailleurs, après une longue politique d'aménagement focalisée sur les plaines, la montagne est en train de devenir un objet d'intervention prioritaire (Bekkari, 2009) à la base d'une évolution des systèmes fonciers, de cultures et d'élevage et donc des mutations spectaculaires qui ont caractérisé la région.

1-1 Le système foncier

Les changements ont touché le régime foncier de la terre. Comme le décrit Bouderbala (1977), avant l'arrivée du protectorat, le Moyen-Atlas est caractérisé par la propriété collective de la terre ; Les parcours tribaux étaient un territoire libre qui n'opposaient que de rares limites au libre déplacement des tribus semi-nomades ou transhumantes (Jennan, 1998). Les propriétés privées (melk) n'étaient dominantes qu'autour de quelques centres urbains et dans les vallées où les propriétaires pratiquaient les cultures. Cependant, le régime colonial a mis les terres collectives sous tutelle de l'état et par la même créé les institutions qui facilitaient et accentuaient le morcellement des terres collectives et la concentration de la propriété foncière. Ce processus de morcellement et de désappropriation s'est poursuivi après l'indépendance avec un rythme plus soutenu.

1-2- L'élevage

Comme nous l'avons déjà évoqué, l'élevage constitue le pivot principal de l'économie montagnarde. En effet, les parcours bénéficient de l'extension des terrains incultes qui représentent plus de 36% des terres au sein du bassin du Haut Sebou. Ces espaces ne cessent d'augmenter du fait de l'exploitation clandestine croissante des espaces forestiers et de la détérioration des pacages (Nejjari, 2004). Le passage d'un mode de transhumance à la sédentarisation, comme le souligne Bekkari (2009), s'est accompagné d'un ensemble de mutations sociales et économiques : une partie de la population a fait de l'agriculture une alternative alors que d'autres ont essayé de combiner agriculture et élevage. Tag (2006) souligne qu'à côté des pratiques traditionnelles, de nouvelles formes d'élevage se mettent en place, comme l'élevage avec stabulation et l'introduction de vaches laitières de pure race.

Par ailleurs, l'état a lancé des programmes pour encourager les éleveurs à améliorer et à intensifier l'élevage.

Pour conclure, la désagrégation du système pastoral, principal base de l'économie de cette montagne a amplement contribué au bouleversement de la structure socio-spatiale et économique du Moyen-Atlas.

1-3 Les dynamiques agraires

En ce qui concerne l'agriculture, Fay (1979) relève que le Moyen-Atlas est en train de passer d'une agriculture de subsistance à une agriculture de transition. En effet, la pénétration de

l'économie coloniale fit de l'arboriculture l'une des spéculations privilégiées sur les terres irriguées. Le succès des premières plantations dans la plaine de Tigrigra et la vallée d'Immouzzar a encouragé leur extension et leur intensification. Ces nouvelles tendances agricoles ont constitué un caractère exceptionnel dans la région. Le froid du climat, l'abondance des eaux d'irrigation ont offert des conditions favorables pour l'extension et l'évolution des plantations de rosacées. Selon Badidi (2005, in Bekkari, 2009) les rosacées ont été introduites sur ces terres au milieu des années 1930, ce qui inaugurerait une époque nouvelle dans l'histoire agricole de la région.

Par ailleurs, plus de trois décennies plus tard, selon Tag (1996) le phénomène des rosacées, particulièrement les plantations de pommiers, de poiriers, de cerisiers etc. attirent, dans le Moyen-Atlas, de plus en plus de capitaux d'origine citadine (Meknes, Fès...). Ces activités qui constituent une nouvelle appréciation des potentialités du milieu naturel montagnard par une partie de ses acteurs locaux, notamment les fellahs (Badidi, 1995) sont une caractéristique majeure des transformations des pratiques agricoles moyen-atlasiennes.

2- L'évolution de l'utilisation agricole dans le Haut Sebou

Dans le Haut Sebou, bien que la surface agricole utile soit limitée, la population locale a réussi à bien mettre à profit cet espace. Ainsi, les cuvettes et les plaines sont utilisées pour l'agriculture, les piedmonts et les causses pour les parcours et les hautes terres pour la forêt.

Avant les années 70, la plupart des exploitations dans le bassin conservaient en général les caractéristiques du modèle type de l'exploitation du secteur traditionnel (Popp, 1986, in Nejjari, 2002) dans lequel la production agricole était généralement orientée vers le marché local. Elle était dominée par les céréales et les olives qui occupaient plus des trois quarts des superficies cultivées.

Après les années 1970, cet espace a connu l'apparition des légumineuses et du maraichage en rotation avec les céréales. D'autre part, pour l'arboriculture, on constate l'apparition des plantations de rosacées (essentiellement pommiers et poiriers) à côté d'oliveraies.

L'intensification des cultures et l'élargissement des surfaces agricoles ont donné lieu à des conflits entre les usagers autour de l'eau et la terre, surtout dans les conditions climatiques défavorables. Ce qui a remis en question la gestion traditionnelle des ressources en eau. Parallèlement, ce changement de comportement culturel conduit à une pression croissante sur la nappe phréatique qui couplée à des sécheresses récurrentes se traduit par un abaissement remarquable de la surface piézométrique.

III- Le système d'irrigation

Kerbout (1991) a défini le système d'irrigation comme "*L'ensemble des règles et des pratiques permettant l'utilisation des ressources hydrauliques dans un cadre socio-économique et politico social*", et dont "*l'élaboration résulte de l'imbrication et de l'interaction d'éléments divers d'ordre naturel (importance du débit...), historique (composantes sociales en place et type d'organisation spatiale...), économique (agriculture de marché ou vivrière), juridique (statut de l'eau et formes de propriétés foncières ...) et en fin politico-spatial (territorialité et pouvoir administrant les affaires du groupe...)*". Cette description correspond à ce qu'on relève dans le bassin du Haut Sebou, où toutes les composantes citées (naturelle, historique, économique, socio-spatiale...) se combinent et caractérisent la gestion des ressources en eau.

Le système d'irrigation comme un " construit social" se compose de trois unités ou maillons : le barrage de dérivation, le réseau d'irrigation et les parcelles desservies (Ait Hamza, 1991, in Madani, 2005).

1- La structure du réseau d'irrigation

La structure physique des réseaux est un élément important de la compréhension de leur fonctionnement : elle conditionne notamment les volumes d'eau mobilisables et les capacités de transport (Jolly, 2001).

1-1- Les seguias

Parmi les caractéristiques de la gestion traditionnelle des eaux, la forme la plus fréquente dans le Haut Sebou est la dérivation de l'eau à partir des rivières vers des conduits ouverts soit en terre, en béton ou les deux. Ces conduits sont appelés « séguia ou targua en berbère » et expriment l'unité de base du système hydraulique paysan (Benali, 2006, Perennes, 1993). Il s'agit d'un canal d'irrigation qui permet d'amener l'eau prise dans l'oued à l'aide d'un barrage, Ougoug, Sed vers les unités irrigués. Le tracé du réseau se fait en laissant couler un filer d'eau. Concrètement, la pente à une double fonction : dominer le maximum de terres irrigables et véhiculer l'eau à une vitesse appropriée (Herzenni, 1987. In bekkari, 2009). Deux types de seguias peuvent être distingués :

- Les seguias traditionnelles en terre sont souvent creusées dans la terre ou formées au niveau de la terre par un mélange de terre et de pierres. Leurs digues sont souvent chargées de la masse provenant des déblais de creusement et des opérations de curages répétées. Il faut noter

que ce type traditionnel est le plus représenté dans le Haut Sebou. Leur mode de conception en font des canaux peu étanches favorisant l'infiltration des eaux, qui présentent une faible résistance aux crues et nécessitent un entretien permanent (Roose, 2010).

- Les séguias bétonnées de conception plus moderne sont moins représentées dans le Haut Sebou, bien qu'elles soient plus efficaces. En effet elles limitent les pertes par infiltration et permettent une augmentation de la superficie irriguée.

Le système séguia s'organise en de multiples canaux distributeurs, hiérarchisés de la séguia principale jusqu'à la branche (mesref) qui irrigue la parcelle (Madani, 2006). Cette structure permet ainsi de partager l'eau entre les confédérations de tribus et entre les différents usagers où chaque seguia bénéficie d'un droit d'eau régularisé

1-2- Les barrages

Les barrages comme premier élément du réseau hydrographique artificiel sont en fait de petites digues rudimentaires construites le plus souvent dans un mélange de terre et de pierres



Photo 8.2 : Endiguement de l'Oued et prise d'eau par canaux traditionnels.

Planche photos 8.3 : Les deux premiers barrages en amont de l'oued Guigou : Barrage Moymouss (à gauche) et barrage Igiw (à droite).



D'après l'enquête menée sur le terrain le finage Guigou-Timahdite possède plus de 30 prises d'eau (barrages). Elles sont pour la plupart de construction traditionnelle avec des blocs de basaltes ou d'autres matériaux locaux. Ces barrages archaïques sont souvent détruits par les crues. Les barrages modernes sont peu nombreux.

2- Périmètres irrigués

Un périmètre irrigué correspond à la surface arrosée par la rivière et donc cultivée en saison sèche. Dans le Haut Sebou on pratique le plus souvent dans ces espaces la culture de l'oignon et de la pomme de terre au rythme d'un assolement biennal. Il existe 3 périmètres irrigués dans le Haut Sebou dont le plus important, par sa superficie et sa population, est celui de Guigou-Timahdite. Ceux de Skoura et d'Immouzar Marmoucha sont d'une superficie plus modeste.

2-1 Périmètre de Guigou-Timahdite

Compte tenu de la valeur de ce périmètre, de nombreux travaux lui ont été consacrés sur les questions liées à l'eau, l'homme, et la terre. On peut citer notamment les travaux de Devos, Nejjari (1998) et Benjelloul (1999). Ce périmètre peut se subdiviser en 3 sous unités distinctes :

- le périmètre de Timahdite qui englobe la plaine de Timahdite et les petites plaines irriguées situés entre Timahdite et Foum Khnig dans la vallée de Guigou.
- périmètre de transition entre la plaine de Timahdite et la plaine d'Almis en aval d'Aït khabach (fig.9.1 et 9.2). Ce périmètre englobe le périmètre de l'Oued Dadora et le périmètre irrigué par les sources de Boughanim et Lmankhar, alors que le périmètre irrigué de Bou Ghanim se développe sur le cône de déjection et les terrasses de l'oued Dardoura
- en aval, le périmètre d'Almis compte environ 4500 ha. Ce sont les terres dans le lit majeur de l'Oued Guigou et les grandes dépressions adjacentes situées entre le pont Aït Khabach et la cluse de Taghzoute en amont de la confluence avec l'Oued El Atchan.

Figure 8. 2 : Localisation ancienne du périmètre agraire (Photos-aériennes : 20, 22, 45 et 47 de 1973).

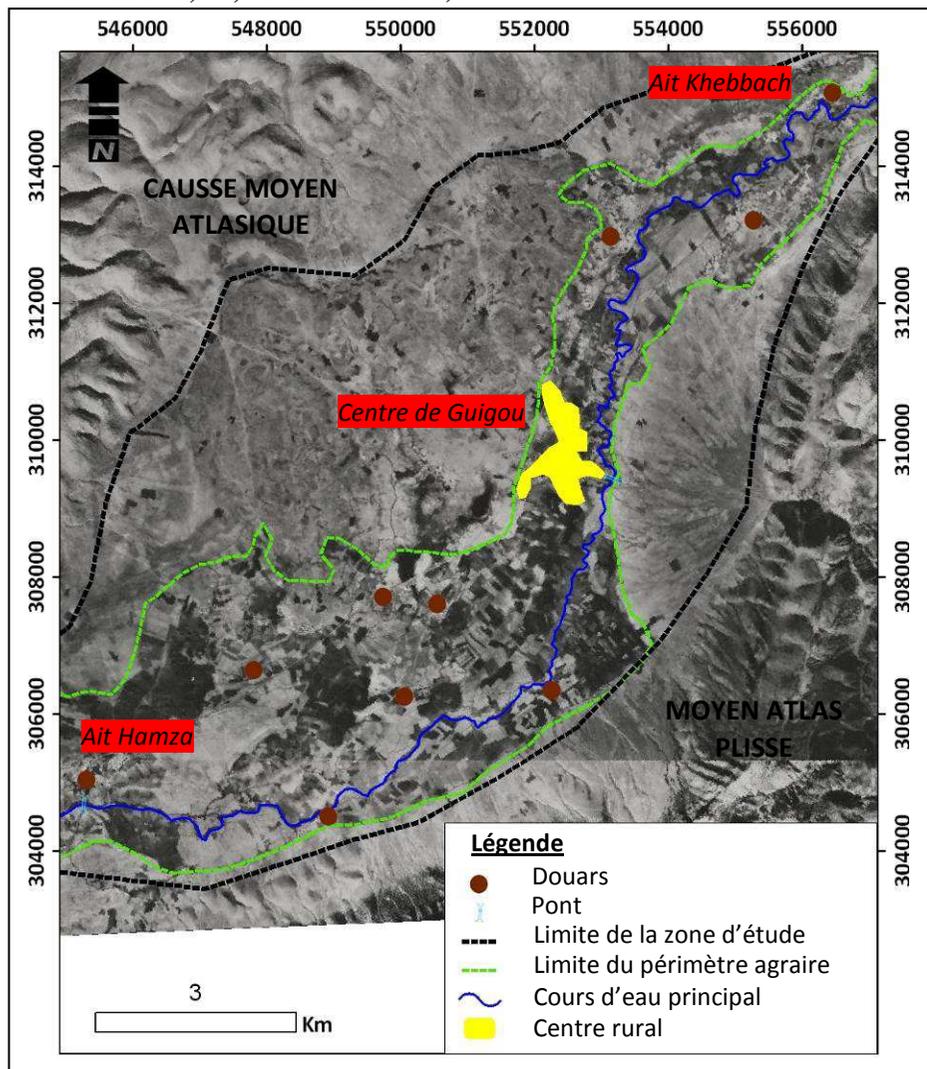
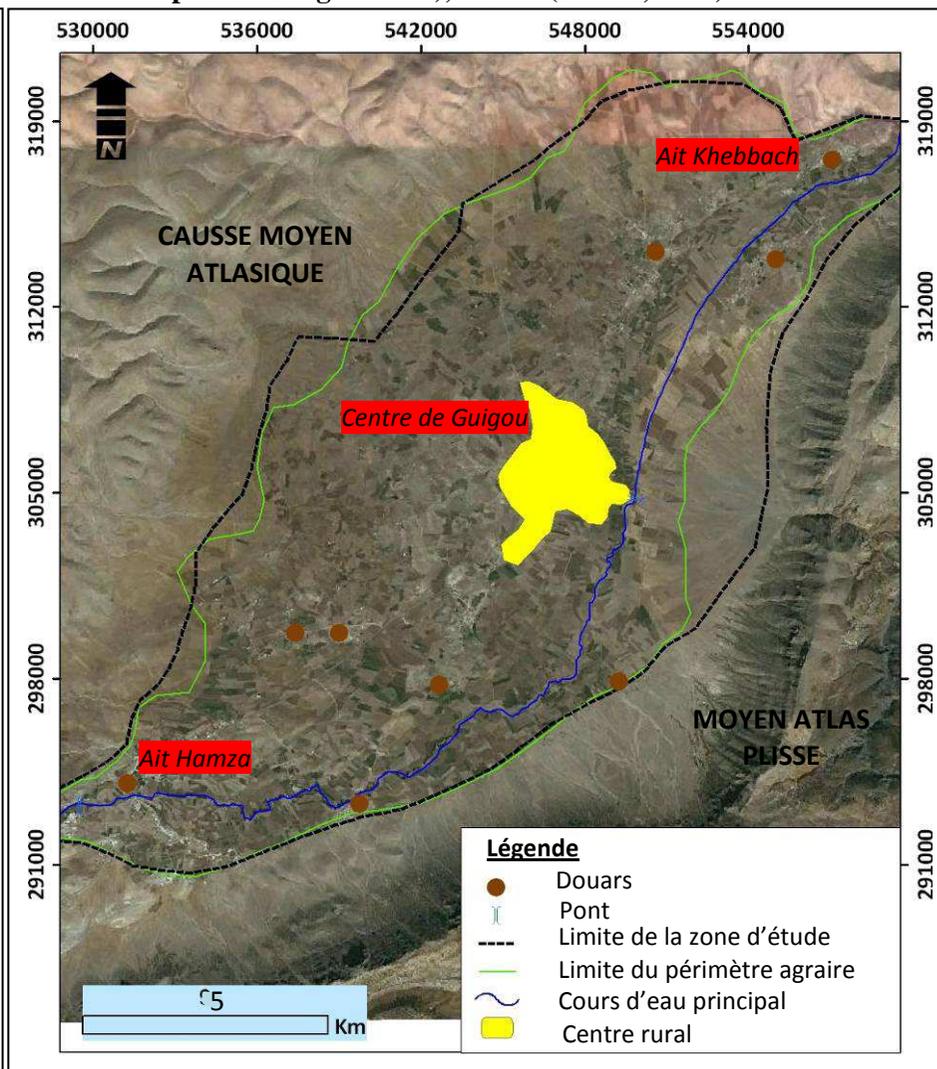


Figure 8. 3 : Localisation actuelle du périmètre agraire (Images satellitaires pris de Google-Earth), source (Samaa, 2010).



2-2- Périmètres de Skoura et d'Immouzar Marmoucha

Par rapport au périmètre de Guigou-Timahdite, les périmètres de Skoura et d'Immouzar Marmoucha, sont moins étendus à cause de la superficie étroite qu'ils occupent ou le type de sols dominant. Comme nous l'avons déjà évoqué la cuvette de Skoura est constitué des terrasses du lit majeur de l'Oued Guigou et des terres dominées par la source de Skoura, bien que d'une superficie irrigable de 2015 ha reste un échec. La surface agricole utile à Immouzar Marmoucha atteint S.A.U : 3950 Ha mais seulement 276 ha en irriguée. Le périmètre longe souvent le lit majeur du l'Oued Maaser ou les terres dominées par les sources comme la Source d'Immouzar.

Tableau 8.3 : Exemple de la répartition de la S.A.U, ainsi que les rendements et les productions réalisés au niveau de la cuvette d'Immouzar ; source : DPA de Missour.

Spécifications	Superficie en Ha	Rendements Q/ha
Céréales :	2418	
Blé dur	759	9-16
Blé tendre	390	
Orge	1125	
Mais	16	
Légumineuses :	10	
Haricot sec	2	
Lentille	3	
Fève	5	
Maraîchage :	19	100-200
Pomme de terre	18	
Carotte et navet	1	
Arboriculture :	63	40-260
Pommier	19	
Cerisier	11	
Poirier	5	
Amandier	20	
Divers	8	
Fourrage :	4	-
Orge fourrager	1	
luzerne	3	
TOTAL	3950	-

3- Le fonctionnement d'irrigation traditionnel

Avant d'aborder ce point, il est lieu de rappeler que Benjlloul (1998) à mené un travail fastidieux dans lequel il a détaillé le fonctionnement et les pratiques de l'eau dans le périmètre de Guigou-Timahdie. Le fonctionnement actuel d'un système d'irrigation est le résultat d'un

processus historique, d'une accumulation de situations qui ont chacune répondu à des contraintes et ont été l'objet de choix, de compromis, de rapports de force (Aubriot, 2000) Néanmoins, d'après Sabatier & Tuf, (1995) ; gérer l'eau signifie être capable d'évaluer la ressource en eau, la capter, la transférer, la répartir dans l'espace et dans le temps, l'amener aux champs avec ou sans exhaure selon les cas, avec des doses et une fréquence d'arrosage en accord avec les besoins en eau des cultures. L'organisation de l'Homme en société et la création de relations sociales ont été à l'origine de l'adoption de règles de partage de la ressource entre les membres de la société. La première ébauche de la gestion de l'eau dans l'histoire donc a été mise en œuvre. Ces règles élémentaires étaient orales et acceptées par toute la société, puisqu'elles sont établies en concertation avec tous les utilisateurs de la ressource (Ouhssain, 2009). Dans ledit bassin, l'irrigation est majoritairement traditionnelle. Elle s'effectue via des prises directes et gravitaires sur les oueds ou avec un réseau de seguias plus modernes (canaux). Les eaux de surface sont réglementées par des usages traditionnels basés sur le principe du "tour d'eau". Le partage de ce dernier repose sur deux paramètres différents : le temps et le volume. Chaque agriculteur bénéficie d'une part donnée d'eau pendant un temps compté. Ces droits de l'eau, acquis par la coutume, sont transmis par héritage (Ftaïta, 2012).

L'irrigation est pratiquée par alternance souvent d'aval en amont (enquête, 2012), c'est-à-dire par succession, à tour de rôle, dans le temps et dans l'espace, dans le cadre d'un cycle de 27 jours comme le cas de périmètre de Guigou-Timahdite. En effet dans un siècle d'irrigation le cours d'eau est réparti en premier lieu entre les fractions de tribus, ensuite entre les douars de chaque fraction de tribu. Signalons ici qu'il y a la confédération des Beni Mguild et celle des Aït Youssi. Cette dernière se compose des fractions suivantes : des Aït Hali, des Aït Kaïs, des Hamza, et des Aït Khabach.

Concernant les Beni Mguild, le fonctionnement est un peu simple, en effet, ce secteur dispose de trois séguias bénéficiant des eaux de la source d'Aberchane. Chaque seguia dessert une communauté pendant un laps de temps déterminé dans le calendrier du tour d'eau (Nouba), (Devos et Nejari, 1998, 2000). Le cycle d'irrigation commence de l'amont vers l'aval ou inversement pour quelques seguias (Aït brahim, Tablyamont ...). Ces seguias ont un cycle d'irrigation qui dure 32 jours. Il reste à noter qu'entre mai et octobre où il y a les cultures de contre saison les unités irriguées utilisent la quasi-totalité des écoulements de la source d'Aberchane. En aval, il y a un secteur de transit entre cette confédération avec la confédération des Aït Youssi, il correspond au cône de déjection de l'Oued Dardoura. Il se

caractérise par l'absence de réseau hydrographique et de douars. Notons ici, que chaque douar correspond souvent à une unité irriguée.

Cependant, pour les finages des Aït Youssi, les seguias bénéficient des eaux de la source de Tit Zil (en moyenne 550 l/s). L'écoulement de l'oued est divisé en 12 part (fas) à l'aide des répartiteurs ou vannes. Des règles acquises par l'expérience estiment qu'un hectare de pommes de terre exige 4 heures d'irrigation par fas qu'une parcelle labourée exige 1h20 mn d'irrigation par 1 fas et par jour (Benjelloul, 1999). Par ailleurs, l'eau de la seguia principale alimente directement des champs et se répartie entre les seguias secondaires en fonction de la superficie des unités irrigués ou le nombre d'irrigants ayant droit. L'irrigation se fait à tour de rôle d'aval en amont ou inversement, su la base d'un tirage au sort qui s'effectue au début du cycle d'irrigation (Benjelloul, 1999).

Après 27 jours du cycle d'irrigation, la rivière libérée vers l'aval (Aït Khabach) est dérivée par deux barrages : une moitié vers la rive droite et l'autre moitié vers la rive gauche. Signalons ici, qu'une durée est prise en considération pour véhiculer l'écoulement d'un secteur à l'autre de l'amont vers l'aval.

Il est nécessaire de noter que souvent l'insuffisance du tour d'eau est comblée par de l'eau provenant de puits soit pour compléter l'irrigation de toutes les parcelle ou entre les tours d'eau pendant la saison sèche lorsque les cultures sont davantage soumises au stress hydrique.

Conclusion du chapitre 8

Compte tenu du contexte climatique semi-aride du pays, il est évidemment claire que la politique d'irrigation au Maroc était un choix rationnel. En effet, les efforts déployés ont permis de réaliser de nombreux enjeux, entre autres : la sécurité alimentaire, un certain équilibre de la balance commerciale, l'infrastructure hydraulique....

Au sein du domaine d'étude, les transformations que connaît le milieu ont provoqué une pression sur les ressources naturelles. Ailleurs dans le Moyen Atlas malgré l'abondance des ressources en eau, les nouvelles dynamiques agraires ont généré une situation de rareté ou de crise. Ce constat exige l'adoption des modes de gestions convenables.

****Chapitre 9 : Analyse de l'enquête**

Sommaire

Introduction

I- Présentation de la méthodologie de l'enquête

1- La méthodologie

2- Dépouillement et analyse des données

II- Résultats

1- La structure foncière

2- L'irrigation avec les eaux superficielles

2-1 Nature et entretien de la Seguia ou (mesref)

2-2 Cycle d'irrigation

2-3 L'importance des cultures pratiquées dans le Haut Sebou

2-4 Les conflits autour de l'eau

3- L'irrigation avec les ressources souterraines

3-1 Caractéristiques techniques des ouvrages

3-2 Domaines d'utilisation

4- L'utilisation pour l'agriculture

4-1 La superficie irriguée par les eaux du puits

4-2 Le fonctionnement de l'exploitation

5- Réaménagement et modernisation

5-1 Remplacement par des cultures moins consommatrices en eau

5-2 La technique du goutte à goutte

Conclusion

Introduction du chapitre 9

D'après Sabatier et Ruf (1992), « la gestion de l'eau est avant tout un construit social, historiquement produit, mais jamais totalement figé car générateur de contingence et donc porteur d'évolution en fonction de tous les imprévus. Ainsi, l'étude d'un système d'irrigation ne se limite pas à l'expression des contraintes actuelles des systèmes de production, mais doit prendre en compte comme objet scientifique la genèse et la vie de la construction sociale ».

Dans la mesure où le Moyen-Atlas fait l'objet de profondes mutations socio-économiques il est crucial d'analyser comment ces changements se traduisent dans les modes d'exploitation de la ressource en eau. En effet, malgré le nombre important de publications, peu traitent de ce sujet en profondeur. Pour pallier l'absence de telles informations une méthodologie d'enquête auprès des agriculteurs du bassin a été engagée. Cette démarche scientifique nous a paru la plus appropriée pour décrire ce phénomène, et pour atteindre cet objectif un questionnaire sur les modalités d'utilisation des eaux de surface et souterraines a été proposé aux agriculteurs du secteur. Après l'exposé de la méthodologie nous en exposons les résultats.

I- Présentation de la méthodologie de l'enquête.

1- La méthodologie

Les pratiques des agriculteurs vis-à-vis de l'eau d'irrigation sont appréhendées à travers les réponses à un questionnaire de 8 pages regroupant 50 questions (annexe. 9.1). Regroupées en 2 thèmes : les questions portent sur les pratiques à l'égard des eaux de surface et à l'égard des eaux souterraines. Elles ont été construites sur la base des travaux antérieurs réalisés sur la gestion de l'eau dans ce territoire ; On peut citer notamment Devos et al., (1998) ; Benjelloul, (1999) ; Nejjari, (2002) et Obda, (2004).

L'enquête s'est déroulée entre avril et mai 2012 et a concerné 350 agriculteurs, répartis dans les 15000 hectares irrigués des différentes cuvettes du bassin dont la plaine de Guigou représente plus de la moitié (60 %). Le choix des agriculteurs s'est fait en fonction de l'accessibilité à l'exploitation et à leur disponibilité lors de nos visites sur le terrain. Le questionnaire a été rempli in situ lors d'un entretien particulier avec l'agriculteur pour s'assurer de sa bonne compréhension des questions ; Ceci est impératif pour que l'analyse des réponses conduise à une description claire et objective de la situation sur l'état, la mobilisation et la gestion de la ressource en eau. D'autre part lors de ces visites, des relevés

sur les moyens techniques d'exploitation de l'eau et plus particulièrement sur la piézométrie de la nappe exploitée ont été faits.

2- Dépouillement et analyse des données

Le dépouillement et l'analyse des informations obtenues s'est fait à partir du logiciel de traitement et d'analyse statistique, SPSS 10. Le préalable a été le codage des réponses dans le format du logiciel (annexe. 9.2) ainsi que l'identification statistiques des variables, car au moment de la saisie, la préoccupation est d'assurer la simplicité des tris (Chardon, 1981). Les résultats obtenus ont fait l'objet de représentation graphique avec le logiciel Excel.

II- Résultats

1- La structure foncière

Les résultats de l'enquête montrent une structure foncière marquée par la superficie très inégale des exploitations agricoles (fig.9.1). Plus de $\frac{3}{4}$ de leur surface sont inférieures à 3 ha et celles de moins d'un ha représentent 42%. Par contre les surfaces de plus de 9 ha ne représentent que 5%. C'est donc la petite taille des parcelles qui domine la structure foncière de cette région.

Figure 9.1 : La superficie des exploitations irriguées dans le Haut Sebou.

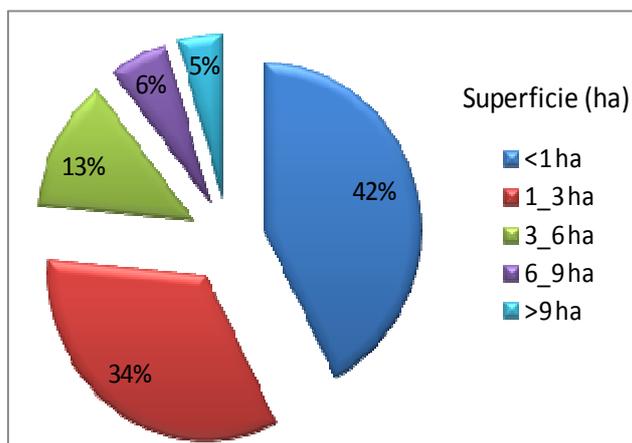
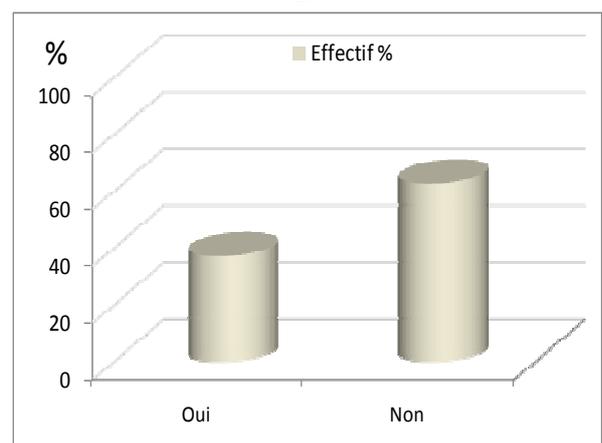


Figure 9.2 : Extension future de la superficie irriguée.



En ce qui concerne l'extension future de la superficie irriguée, les dynamiques agraires que connaissent quelques périmètres irrigués, notamment la plaine de Guigou conduit 38 % des enquêtés (fig.9.2) à envisager l'extension des parcelles irriguées. Ceci est dû notamment au succès des cultures contre saison (oignon et pomme de terre).

Néanmoins soulignons que ces propriétés sont réparties en parcelles réduites et éparpillées, pouvant être partagées en deux phases de mise en culture en fonction des températures et les disponibilités en eau dans la rivière ou de la source ; Dans ces cas il est difficile pour les propriétaires de développer et de moderniser leurs exploitations agricoles. C'est notamment le cas pour l'équipement en technique du goutte à goutte. Autrement dit, la dispersion des propriétés constitue un handicap à une meilleure gouvernance de la ressource en eau.

À l'instar de plusieurs régions du Maroc, l'eau dans le Haut Sebou est liée à la terre. Toute parcelle située dans le périmètre irrigué possède un droit d'eau généralement notifié dans le titre foncier. Le propriétaire d'une terre irrigable possède donc un droit d'eau inaliénable pour cette terre (Riaux, 2006), et cette possession augmente le pouvoir de l'individu (Ait Hamza & Akdim, 1988). Néanmoins comme on l'a vu dans le chapitre précédent, l'irrigation dans le bassin du Haut Sebou, majoritairement traditionnelle, est réglementées par des coutumes basées sur le principe du "tour d'eau". En revanche, le pompage des eaux souterraines n'est soumis à aucun contrôle et le plus souvent le puits se fait sans autorisation contrairement à la loi. Récemment, les services concernés (ABHS) ont pris l'initiative de mener des campagnes qui ont pour but de faire respecter la réglementation en vigueur et d'aboutir à la régularisation des puits déjà en place.

2- Irrigation avec les eaux superficielles

2-1- Nature et entretien de la Seguia (mesref)

L'irrigation s'effectue par gravité, du canal principal (séguia) dans le canal secondaire (souvent appelé mesref), et de là, elle submerge les champs individuels.

Dans le bassin le réseau de séguias (ou séguias + mersf) est constitué par la juxtaposition de deux systèmes, l'un dit moderne et l'autre traditionnel. Les seguias traditionnelles, en terre, représentent plus de la moitié du réseau (52%), tandis que les seguias modernes, en béton ne constituent que 22% du réseau. Le réseau des seguias de construction mixte représente 26 %, (fig.9.3).

Bien que les séguias en béton ne représentent que 1/5 du réseau 86% des agriculteurs ont conscience que les séguias traditionnelles sont à l'origine de déperdition des eaux par l'infiltration et l'évapotranspiration, (fig.9.4).

Figure 9.3 : Nature du réseau des seguias dans le bassin du Haut Sebou.

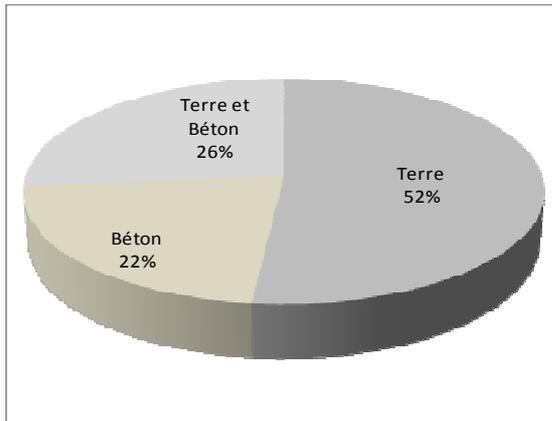


Figure 9.4 : Contribution des seguias en terre à la perte de l'eau.

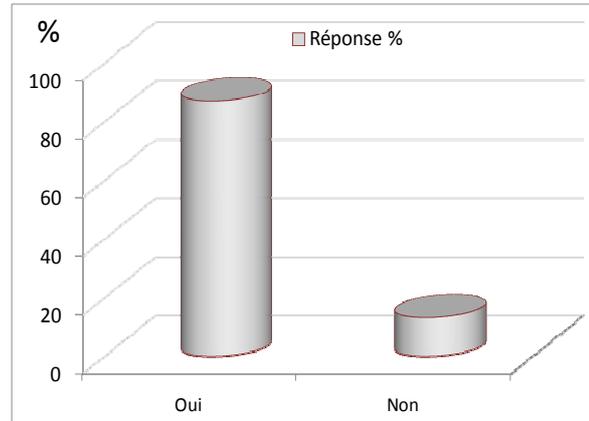


Photo 9.1 : Seguia en terre.



Photo 9.2 : Seguia en béton.



Photo 9.3 : Seguia en béton et en terre.



Photo 9.4 : L'irrigation gravitaire.



Sur le bassin il y a également des ouvrages modernes, bétonnés et équipés de vannes (planche photos 9.1). Ce type d'ouvrages contribue à sauvegarder la ressource en eau et à améliorer l'efficacité de l'irrigation.

Planche photos 9.1 : Exemple de seguias équipées de vannes dans la plaine de Guigou



Les types de barrages de dérivation des eaux à partir de l'oued vers les prises-séguias sont parfois construits avec des matériaux traditionnels, peu résistants aux crues ; De tels barrages sont fréquemment détruits lors de passages des crues. Dans ce cas les usagers de l'aval participent aux travaux d'entretien ou de la réparation de l'amont. A cet égard, la construction ou l'entretien d'une séguia se fait souvent d'une manière collective, pour 80 % des cas (fig.9.5), soit par la tribu, la fraction ou par le douar, selon l'utilité commune de la seguia.

L'exécution des travaux d'entretien du réseau d'irrigation (le curage, le colmatage, etc.), est souvent coordonné par un chef. C'est une personne 'sage', investie dans sa fonction par les usagés ; Ce Mkadem (ou Cheikh Elma, Amghar..., son nom défère d'une région à l'autre) est en charge de la gestion du tour d'eau, ainsi il peut porter un jugement qui se réfère au règlement communautaire. Pour assurer sa mission, les ayants droits mettent à sa disposition la main d'œuvre nécessaire. Selon l'enquête, 69 % des usagés ont répondu que la gestion des travaux correspond à cette pratique Sur les autres secteurs la gestion des travaux est collective (Fig.9.6).

Figure 9.5 : Mode d'entretien du réseau d'irrigation.

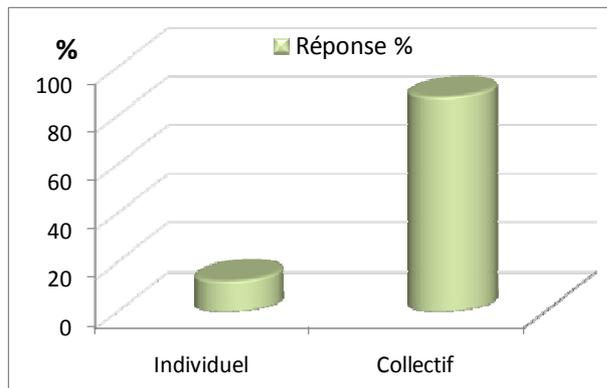


Figure 9.6 : Mode de gestion des travaux d'entretien du réseau d'irrigation.

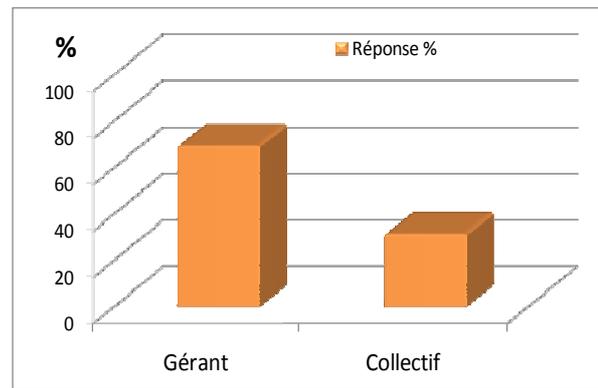


Photo 9.5: Le curage de la Séguia après le passage d'une crue.

2-2 Cycle d'irrigation

Dès la construction de la seguia, un tour d'eau est instauré, et la distribution se fait par rotation soit dans le temps (journée ou heure d'eau) soit par terroir (tribu par tribu, fraction par fraction, douar par douar, famille par famille ou parcelle par parcelle). Entre les communautés, la priorité de l'amont ou de l'aval est basée sur le droit coutumier, ou bien par un tirage au sort au début du cycle d'irrigation. Les règles de partage de l'eau sont négociables autour d'une valeur de débit, d'un temps d'arrosage et d'une fréquence d'irrigation, cohérentes avec les besoins en eau des cultures pratiquées (Sabatier & Ruf, 1992). Dans le Haut Sebou, la durée, en jour, du cycle d'irrigation est variable d'une région à une autre. Le cycle dépend du débit et de la superficie du périmètre irrigué. Pour la plaine de Guigou, un cycle d'irrigation est de 27 jours. L'eau est répartie en premier lieu entre les fractions de tribus, ensuite entre les douars de chaque fraction de tribus, puis entre les familles ou les

agriculteurs (Benjelloul, 1999). Dans les autres plaines et cuvettes (Serghnia, Skoura, Immouzzar Marmoucha..) où les terres agricoles sont moins importantes la durée du cycle d'irrigation est réduite.

La figure (9.7) ci-dessous récapitule les résultats obtenus par l'enquête. 29 % des usagers ont confirmé que le tour d'eau est de 21 à 28 jours. C'est le cas par exemple de la plaine de Guigou, dont le cycle d'irrigation commence par les Ait Halli en l'aval et se termine en amont par les Ait Hamza. En outre, 15 % des enquêtés ont dit que le tour d'eau est de 14 à 21 jours. Par contre, 26 % nous ont dit que le cycle est de 7 à 14 jours. Par ailleurs, dans les petits périmètres irrigués, le tour d'eau ne dépasse pas une semaine, d'après 26 % des ayants droits.

La longue durée entre les tours d'eau met en difficulté les cultures de contre saison (de mai à septembre), les plus consommatrices des eaux (pomme de terre, oignon...) et qui ne supportent pas le stress hydrique, De ce fait, pour ces cultures l'utilisation des eaux des puits est indispensable.

Ce pose également le problème de l'insuffisance de la quantité d'eau durant un tour d'eau qui ne permet pas d'irriguer toutes les parcelles cultivées d'un agriculteur. Ce problème se renforce surtout en saison sèche, pour laquelle le débit est faible. Dans ce contexte, 51,9 % des enquêtés ont affirmé que la part (quantité) légale ne suffit pas pour irriguer toutes ces parcelles cultivées. Dans ce cas, la plupart des irrigants se dirigent vers la location ou l'achat d'eaux d'autres propriétaires. En revanche, 48 % des irrigants ont déclaré que la quantité d'eau est suffisante pour satisfaire leurs besoins (fig.9.8).

Figure 9.7 : La durée du tour d'eau

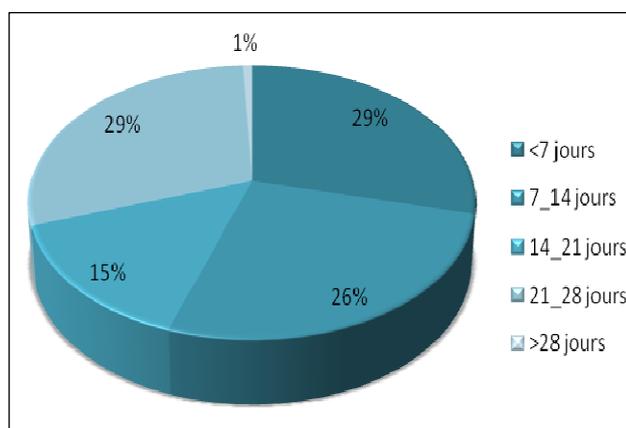
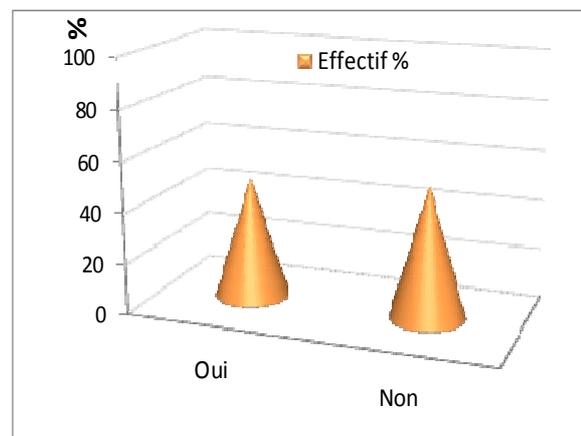


Figure 9.8 : Suffisance de la part des eaux.



Pour évaluer les besoins en eau des cultures pendant la saison sèche, on a demandé aux agriculteurs de combien de tour d'eau sont nécessaires pour les parcelles cultivées. Les

réponses sont disparates d'un agriculteur à un autre et d'une région à une autre (fig.9.9). Cela s'explique essentiellement par les conditions édaphiques et thermiques. En d'autres termes, plus le sol garde l'humidité plus le nombre des tours d'irrigation se réduit. 11% des enquêtés ont répondu que 3 tours d'irrigation peuvent satisfaire les besoins d'une culture ; il s'agit notamment des régions où la température est moins élevée comme c'est le cas à Imouzar Marmoucha et Skoura. En revanche, 42% ont affirmé que les cultures en saison sèche nécessitent 4 tours d'irrigation, et 19 % ont déclaré un besoin de 5 tours. Ceux affirmant le besoin de 6 tours et plus représentent 17% de l'échantillon. Signalons que la plupart des paysans cultive le maïs pendant la saison sèche, sauf dans la plaine de Guigou-Timahdite où la culture de la pomme de terre et de l'oignon est dominante.

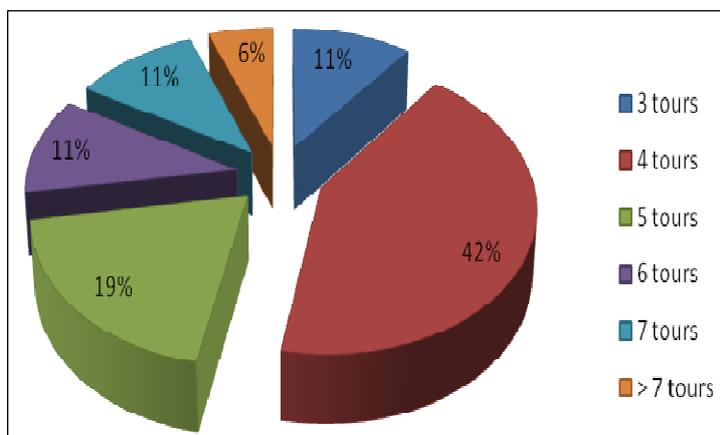


Figure 9.9 : Besoins en tours d'eau pour les cultures en saison sèche selon les enquêtés.

2-3 L'importance des cultures pratiquées dans le Haut Sebou

Lors des enquêtes menées sur le terrain, il a été demandé aux agriculteurs de « classer les types de culture (en irrigation et en bour) qu'ils pratiquent selon l'importance? ». À cette question, des réponses très diverses ont été apportées (fig.9.10). On constate la dominance des céréales, le blé, l'orge et le maïs, dans toutes les régions du Haut Sebou, où 68,2 % des paysans indiquent qu'elles occupent le premier rang parmi les cultures pratiquées tandis que chez 27,3 % des enquêtés elles sont classées au 2^{ème} rang. Il est à souligner ici que le blé, l'orge et les lentilles sont considérés comme des cultures pluviales, de saison froide et humide. À l'exception de la plaine de Guigou-Timahdite, ces cultures sont souvent utilisées en autoconsommation (Serghina, Skoura...). Ce patchwork de cultures est l'une des caractéristiques de l'agriculture dans le Moyen Atlas.

Le maraîchage occupe le premier rang chez 53,7 % des agriculteurs. En outre, il arrive au deuxième rang chez 28% des enquêtés et en 3^{ème} rang chez 4% des enquêtés. Soulignons que

la culture de maraichages, surtout la pomme de terre et l'oignon, a connu un développement remarquable dans la région de Guigou-Timahdite, où la production s'oriente plutôt vers les grands marchés du Maroc. En revanche, pour la plaine de Serghina, la cuvette de Skoura, et Immouzar Marmoucha, les maraichages entrent dans la catégorie des cultures vivrières en raison de la superficie réduite des exploitations et l'absence de moyens qui n'encouragent pas la modernisation de ces cultures.

L'arboriculture est le troisième grand type d'exploitation agricole dans le Haut Sebou. Elle arrive au premier rang chez 30% des enquêtés. Pour 8% elle occupe le deuxième rang et pour 1% le 3^{ème} rang.

L'arboriculture dans le Haut Sebou se compose toujours d'oliveraies avec une extension importante des plantations de rosacées (essentiellement pommiers, poiriers, cerisiers, abricotiers, etc.). Cette culture est considérée comme une source rentable car ne demandant pas beaucoup de main d'œuvre. Elle est caractéristique de la modernisation et des mutations qui caractérisent les activités agricoles dans le Haut Sebou. L'extension de cette culture s'accompagne souvent d'une pression sur la nappe profonde.

Figure 9.10 : Classification par ordre d'importance des cultures pratiquées dans le Haut Sebou

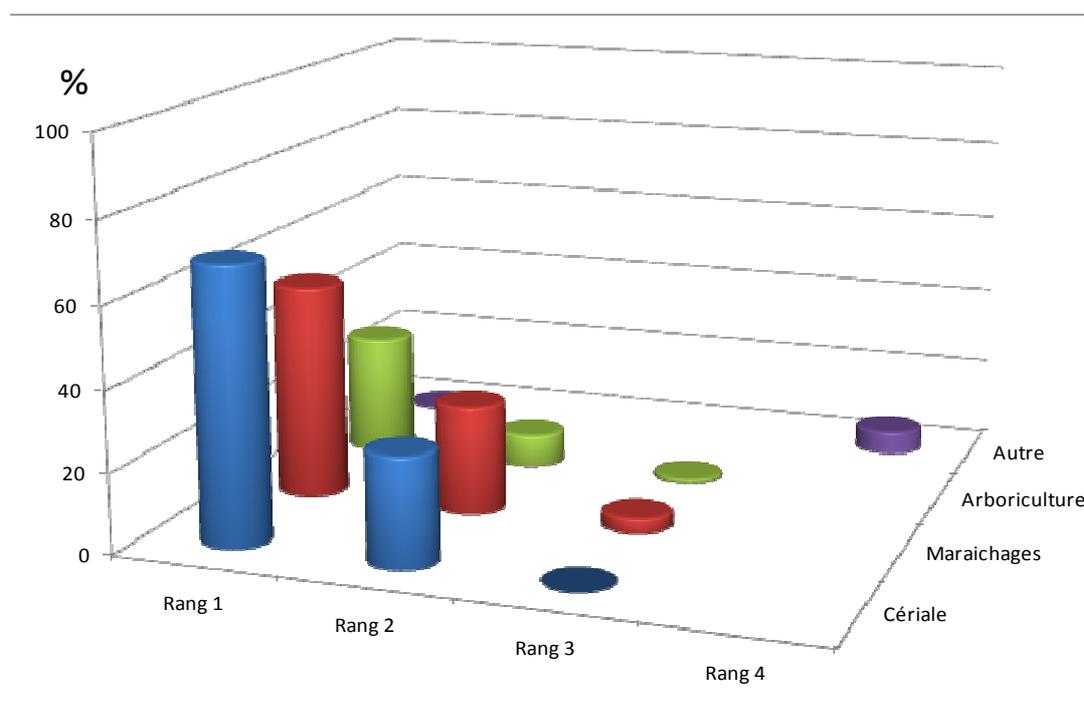


Planche photos 9.2 : L'oignon et la pomme de terre dans la plaine de Guigou



2-4 Les conflits autour de l'eau

Le potentiel croissant de conflits autour de l'eau représente un défi autant pour la recherche scientifique que pour la pratique politique et les stratégies de développement (Houdret, 2008). Certes, la gestion et la répartition de l'eau ont toujours impliqué des conflits, le phénomène en soi n'est donc pas récent (Taylor, 2006 ; Mathieu et al., 2001).

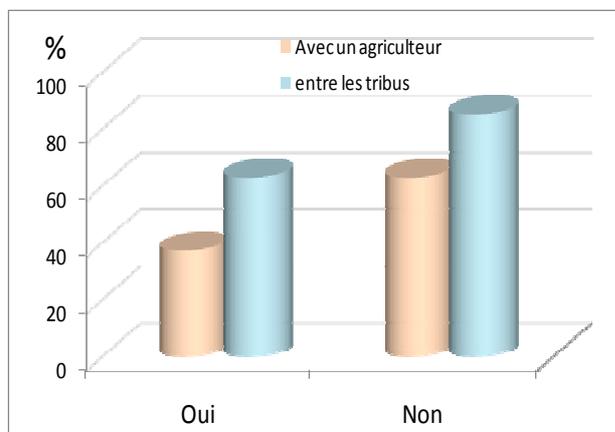


Figure 9.11 : Conflits et confrontations entre les usagers autour de l'eau.

Bien que Coser (1965) considère ces conflits comme des phénomènes normaux dans toute relation sociale, ils entraînent, dans un certain nombre de cas, des confrontations plus ou moins violentes. En effet dans le Haut Sebou, l'évolution des activités agricoles et la pression exercée sur la ressource en eau accompagnées par des situations de concurrence locale produisent souvent des conflits entre les usagers notamment pendant des périodes sèches sévères engendrées par des conditions climatiques défavorables. Lors des enquêtes menées sur le terrain, nous avons questionné les agriculteurs à propos des conflits autour de l'eau soit entre les usagers soit entre les tribus. Concernant les conflits entre les usagers, 37% des paysans (fig.9.11) ont affirmé qu'ils ont eu un conflit avec d'autres agriculteurs. Par ailleurs, le

nombre de conflits entre les tribus ou les douars est remarquable. En effet, 85 % des enquêtés ont cité des conflits ou des confrontations autour de l'eau. Ces conflits sont parfois violents comme le cas de 199*à Guigou et souvent engendrés par le non-respect des règles coutumières.

- **Rôle d'Amghar Ouamane et de la Jmaâ**

Il est plus utile de montrer la fonction de ces deux éléments en vu de leur importance dans la gestion traditionnelle de l'eau de la rivière ou de sources. En effet, la Jmaâ (Takbilt) est le comité de sages représentant toutes les fractions constituant une ethnie ou une tribu. On la trouve au niveau de chaque douar, elle est constituée sur une base ethno-lignagère. Son pouvoir est reconnu moralement et s'applique sans force physique. En matière d'irrigation, le rôle de la Jmaâ était et reste encore aujourd'hui d'une importance sans égal explique Hrou (2013). Souvent, la Jmaâ a mis en place une organisation spéciale avec à sa tête un chef (Amghar ntarga ou Amghar Ouamane : grand chef de l'eau) élu par les ayants droits pour une année renouvelable dans la plupart des cas. En effet, dans chaque sous unité il y a un chef d'irrigation la résolution des conflits entre les usagers fait partie des missions de l'Amghar. Par ailleurs, il veille sur la répartition de la rivière entre les seguias, les douars et les individus, et supervise ainsi les travaux des seguias et du barrage (Benjelloul, 1999).

3- L'irrigation avec ressources souterraines

Le déficit en eau de surface est souvent comblé par l'exploitation des ressources souterraines pour garantir les besoins exigés par la progression des activités de la population. De ce fait, le Haut Sebou et surtout la plaine de Guigou ont connu une pression très forte sur les ressources en eaux souterraines. En effet, depuis plusieurs années, la diffusion de techniques de forage et de pompage a permis un développement rapide de l'usage privé des eaux souterraines pour l'irrigation et l'intensification des activités agricoles. Ce changement dans les pratiques d'irrigation, débuté par l'introduction de la motopompe dans les années 1970 a engendré une révolution agricole au sein du système traditionnel, (Boujnikh, 2008). Désormais, les forts prélèvements progressent alors que les années déficitaires en eau entraînent une diminution remarquable de la recharge des aquifères.

Afin d'évaluer l'extension et la gestion de l'utilisation des ressources souterraines dans le Haut Sebou, un volet de l'enquête lui est spécifique et a concerné un tiers des enquêtés.

3-1 Caractéristiques techniques des ouvrages

L'enquête révèle que la majorité des ouvrages ont été creusés après les années soixante-dix parallèlement avec l'essor économique qu'a connu le Haut Sebou notamment la plaine de Guigou. 3 % des enquêtés ont creusé l'ouvrage avant les années 1980. Le nombre des ouvrages creusés va augmenter au début des années 1985 où 11% ont mis en place l'ouvrage dans cette période marquée la sécheresse qu'a connu le Maroc. A partir du milieu des années 1990; le creusement des ouvrages a connu une évolution remarquable, cela est dû à l'intensification des cultures rentables (pomme de terre et oignon). En effet, 27 % des interrogés ont creusé leurs ouvrages entre 1990 et 2000. En outre, entre 2000 et 2010, 46 % des enquêtés ont creusé l'ouvrage dans cette période.

Lors de l'enquête, il a été demandé aux agriculteurs de citer le nombre de puits qu'ils possèdent. La majorité, soit 91% des agriculteurs disposent d'un puits, 7% en possèdent 2 et 3% en possèdent 3.

Figure 9.12 : Dates de creusement des puits.

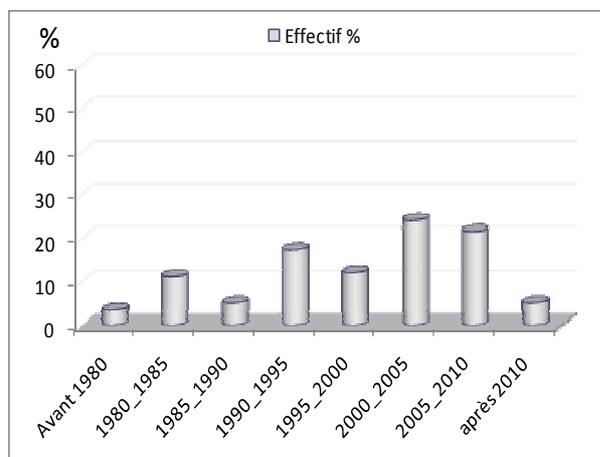
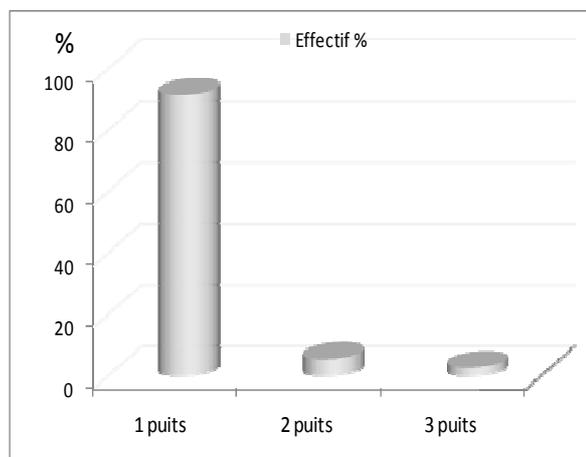
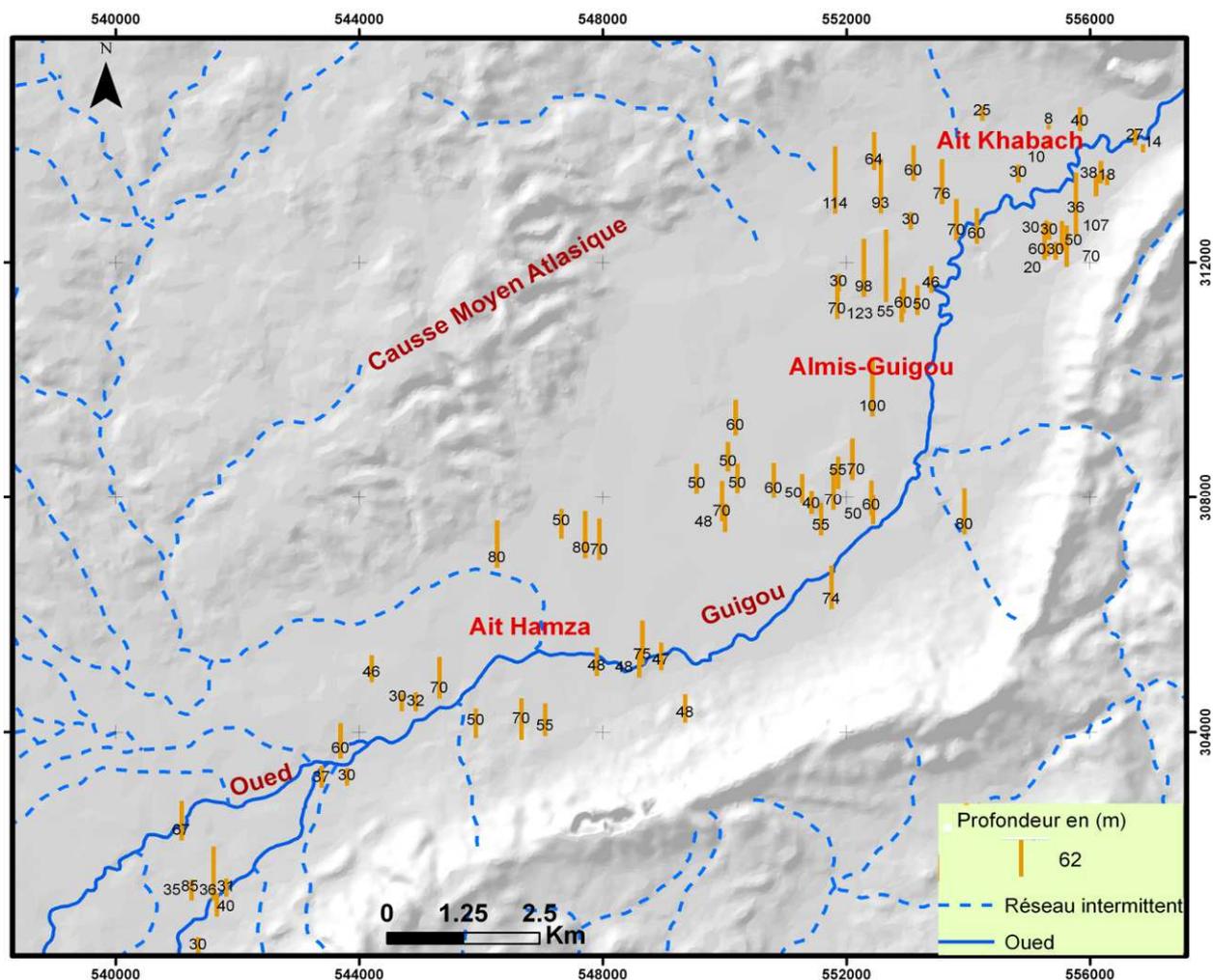


Figure 9.13 : Nombre de puits chez les agriculteurs.



La profondeur des puits varie d'une zone à l'autre en fonction de la profondeur de la nappe phréatique et du coût investi par l'agriculteur. Il faut distinguer deux types d'ouvrages. Le puits creusé manuellement, est inférieur à 30 m de profondeur ; Il est en effet dangereux de descendre plus profondément dans ces conditions. Par contre, les forages peuvent descendre à plus de 120 m. Le choix du type d'ouvrage dépend essentiellement des données hydrogéologiques, de la profondeur de l'aquifère, de la rapidité recherchée et de l'investissement possible. La carte (fig.9. 14) donne une idée sur la profondeur de quelques ouvrages dans le Guigou.

Figure 9.14: Carte illustrant la profondeur de quelques ouvrages dans la plaine du Gigou.



Après le premier creusement de l'ouvrage, 40% des enquêtés ont approfondi le puits à cause de nombreuses raisons. On constate que les dates de recreusement correspondent aux pics de premier creusement (fig.9.15). 41% des enquêtés ont approfondi l'ouvrage entre 2000 et 2005 et 32% entre 2005 et 2010.

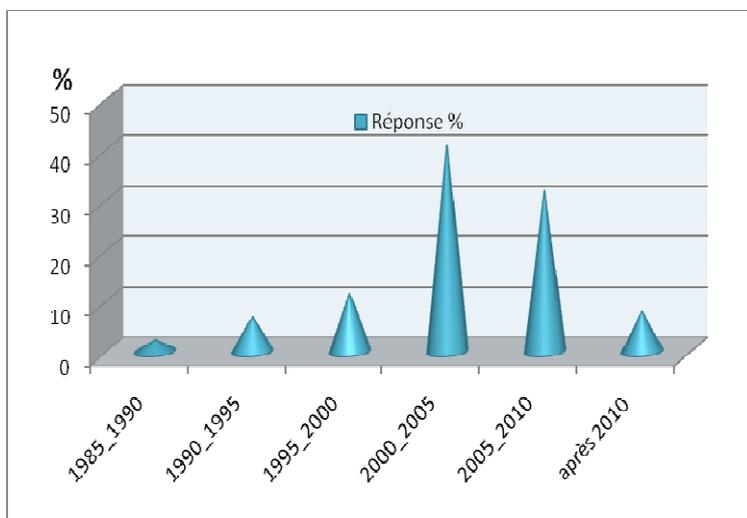


Figure 9.15 : Date d'approfondissement des ouvrages après le premier creusement.

Les facteurs qui poussent les agriculteurs à approfondir l'ouvrage sont nombreux. La baisse du niveau piézométrique constitue le premier facteur où 43% des enquêtés ont affirmé cela (fig.9.16) ; ajoutons aussi le facteur de l'assèchement du puits (34%). Cependant, 24% des agriculteurs ont approfondi le puits pour renforcer le volume d'eau afin de satisfaire les besoins. Par ailleurs, la moitié des enquêtés qui ont approfondi leurs ouvrages ont ajouté moins de 15 m de profondeur après le premier creusement, cependant, 24% ont affirmé que la profondeur ajoutée a été entre 15 et 30 m. en revanche 21% ont approfondi leur puits plus de 30m.

Figure 9.16 : Les causes d'approfondissement du puits.

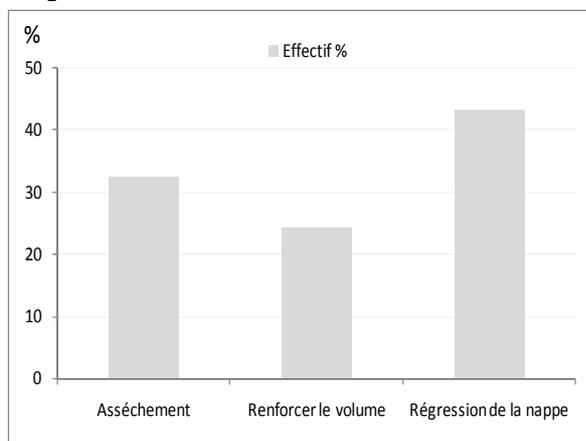
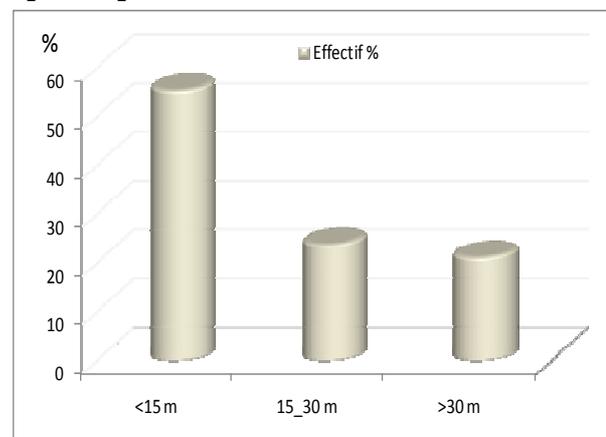


Figure 9.17: Nombre de mètres approfondis après le premier creusement.



Concernant le coût d'investissement et de creusement du puits, il varie d'un agriculteur à l'autre. Il dépend essentiellement du type d'ouvrage, de la profondeur / le diamètre, de la nature lithologique et de la technique utilisée. Pour les puits un mètre coût entre 300 et 500 dh, la figure (9.18) résume les différences du coût d'investissement entre les paysans.

Il a été demandé aux enquêtés d'indiquer les principales contraintes au creusement ou à l'utilisation des eaux de puits. Les frais de creusement (fig.9.19) sont la première contrainte pour 44% des enquêtés. La deuxième contrainte (31%) est la complexité des procédures d'autorisation (annexe. 9.3). En outre, dans quelques zones la profondeur importante de la nappe engendre un coût d'investissement trop élevé pour 20% des agriculteurs. A ces coûts de réalisation, les coûts d'exploitation représentent un frein pour 5% des enquêtés. .

Figure 9.18 : Coût d'investissement pour le creusement.

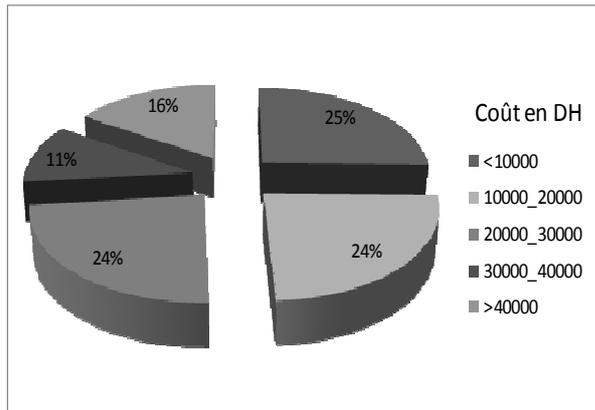
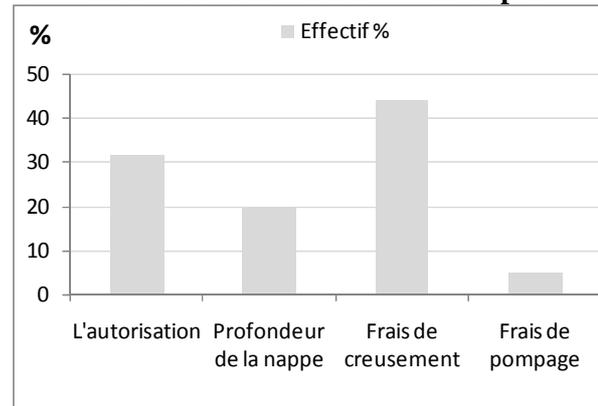


Figure 9.19 : Les contraintes empêchant le creusement ou l'utilisation des eaux du puits.



3-2 Domaines d'utilisation

L'agriculture est le secteur le plus important pour l'utilisation de l'eau souterraine (fig.9. 20) : 52% des agriculteurs utilisent les eaux des puits pour l'irrigation des cultures et 22% l'utilisent pour abreuver le bétail. A cet égard rappelons que l'élevage, d'ovins, de caprins, et de bovins pour l'essentiel, reste une des activités principales dans le Haut Sebou

L'enquête a démontré aussi que les eaux souterraines sont utilisées pour l'eau potable pour 13% des enquêtés, et pour des besoins domestiques pour 12%. Ajoutons que l'exploitation des eaux de puits pour d'autres activités ne représente que 1% (moulin d'olivier).

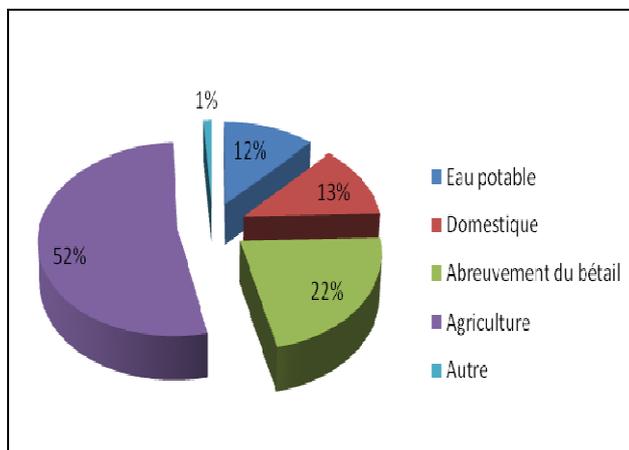


Figure 9.20 : Domaines d'usages des eaux souterraines dans le Haut Sebou.

4- L'utilisation pour l'agriculture

4-1- La superficie irriguée par les eaux du puits

La superficie irriguée par les eaux souterraines varie d'un agriculteur à l'autre. En effet, selon les réponses des enquêtés, on a constaté que la majorité des agriculteurs soit 42 % irriguent

par le puits une superficie comprise entre 3 à 6 ha, suivie par celles comprises entre 1ha à 3 ha (41 %) et celle moins d'un hectare (7%). En revanche, les agriculteurs irriguant par le puits des superficies plus de 6 ha représentent 17% des enquêtés (figure. 9. 21).

Comme il a été illustré, 52% des enquêtés utilisent les eaux des puits pour l'irrigation. De ce fait, on a essayé de savoir les types et la priorité des cultures irriguées par le pompage. La figure (9. 22) montre que les cultures de contre saison (pomme de terre et oignon) se place dans le premier rang chez 51% des enquêtés au niveau d'irrigation par les eaux des puits. Ces cultures implantées au début des années 1990 ont connu un grand succès et une intensification continue notamment dans la plaine de Guigou de fortes rentabilités. Cette évolution était le principal facteur de l'extension du phénomène de pompage dans les nappes. Cependant, 45 % des agriculteurs utilisent les eaux de puits mais avec une fréquence plus faible que celle nécessaire pour la pomme de terre et l'oignon, qui ont besoin d'au moins de 7 tours d'eau pour leur croissance. Par ailleurs, les agriculteurs qui utilisent les puits pour irriguer l'arboriculture ne représentent que 2% des enquêtés.

Figure 9.21 : La superficie irriguée par les eaux du puits

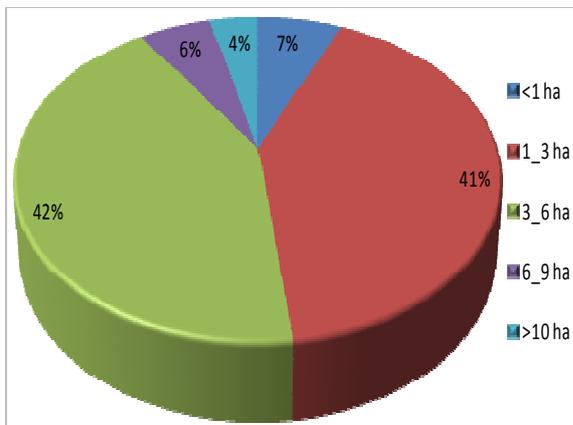
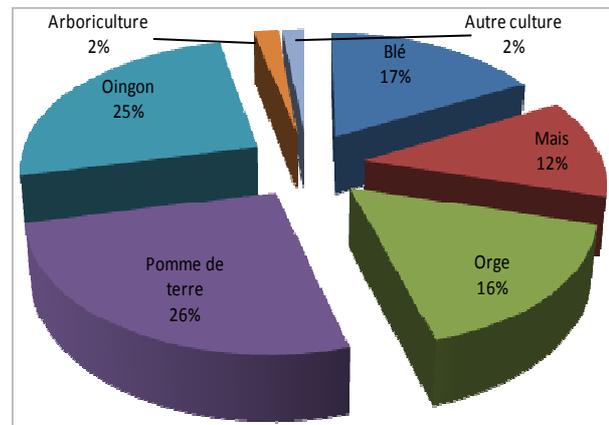


Figure 9.22 : Les types des cultures irriguées par les eaux des puits



4-2- Le fonctionnement de l'exploitation

Pour mettre en évidence la pression exercée sur les ressources en eau souterraines, on a demandé aux agriculteurs d'illustrer la fréquence de l'exploitation des eaux de puits et de forages. On peut considérer que les ¾ des agriculteurs utilisent abondamment la ressource souterraine : 63 % des enquêtés utilisent les eaux de puits et de forages d'une manière quotidienne et souvent pour l'agriculture et 14 % de 4 à 6 fois par semaine. Tandis que 12% l'exploitent de 2 à 3 fois par semaine et 11 % une fois par semaine (fig.9.23).

Contrairement à la gestion des ressources superficielles qui dépend de règles rigoureuses, l'exploitation des ressources en eaux souterraines ne suit aucune règle. En effet, l'enquête sur le terrain a illustré que le nombre des heures de pompages pendant chaque utilisation varie d'un agriculteur à l'autre. Ainsi, 19% des enquêtés utilisent la motopompe plus de 18 heures (fig.9.24), 20% plus de 12heures (12 à 18h), 59% de 6h à 12h et 2% inférieur à 6 h. Par ailleurs les enquêtés ont pratiquement toutes les mêmes motopompes dont la capacité d'extraction est de 3,5 m³/h (planche photos 9.3) ce qui nous permet d'estimer les quantités d'eau pompées dans les nappes.

Figure 9.23 : Fréquence d'utilisation des eaux des puits dans le Haut Sebou. **Figure 9.24 : Nombre des heures de pompage.**

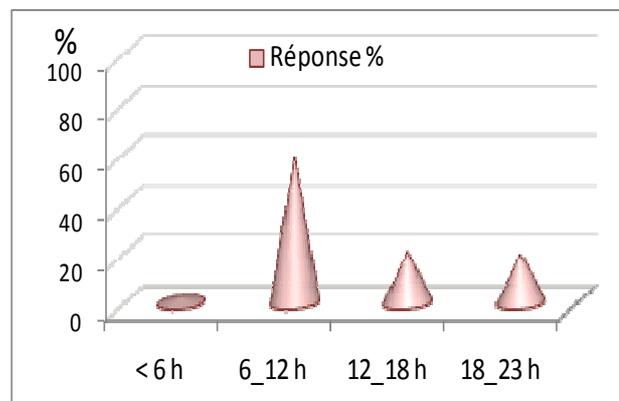
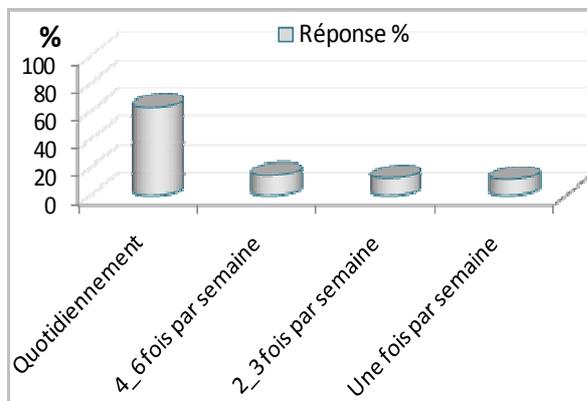


Planche photos 9.3 : Exemple de motopompes utilisés de le Haut Sebou.



Sans surprise, la pression sur la ressource en eau souterraine est prépondérante de mai à août ; durant cette période les cultures pratiquées (pomme de terre, oignon) sont les plus consommatrice d'eau. La pression est un peu plus faible pour les mois d'avril, septembre et octobre et quasi nul de novembre à mars (fig.9.25).

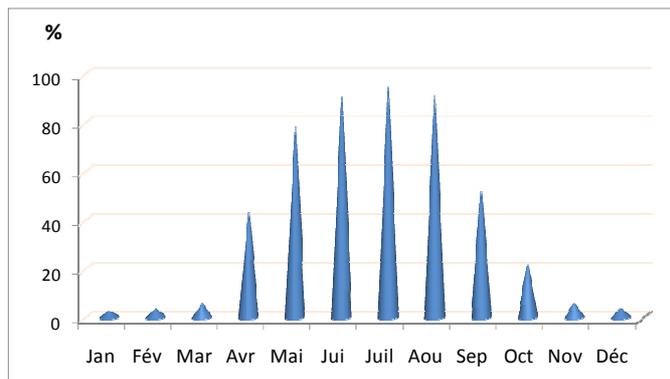


Figure 9.25 : Les mois où les agriculteurs utilisent beaucoup les eaux du puits.

A l'aide d'une sonde piézométrique (photo 9.7), le niveau piézométrique dans la plaine de Guigou a été mesuré à partir des puits accessibles. Les relevés obtenus donnent une idée cependant partielle de la profondeur de la surface piézométrique (fig.9.26) du fait du fonctionnement des pompes durant certaines mesures. Dans ce cas, la cote inclut le rabattement artificiel de la nappe.



Photo 10.6 : Illustration d'une mesure manuelle du niveau de la nappe.

Figure 9.26 : Carte de la piézométrie (mai 2012).

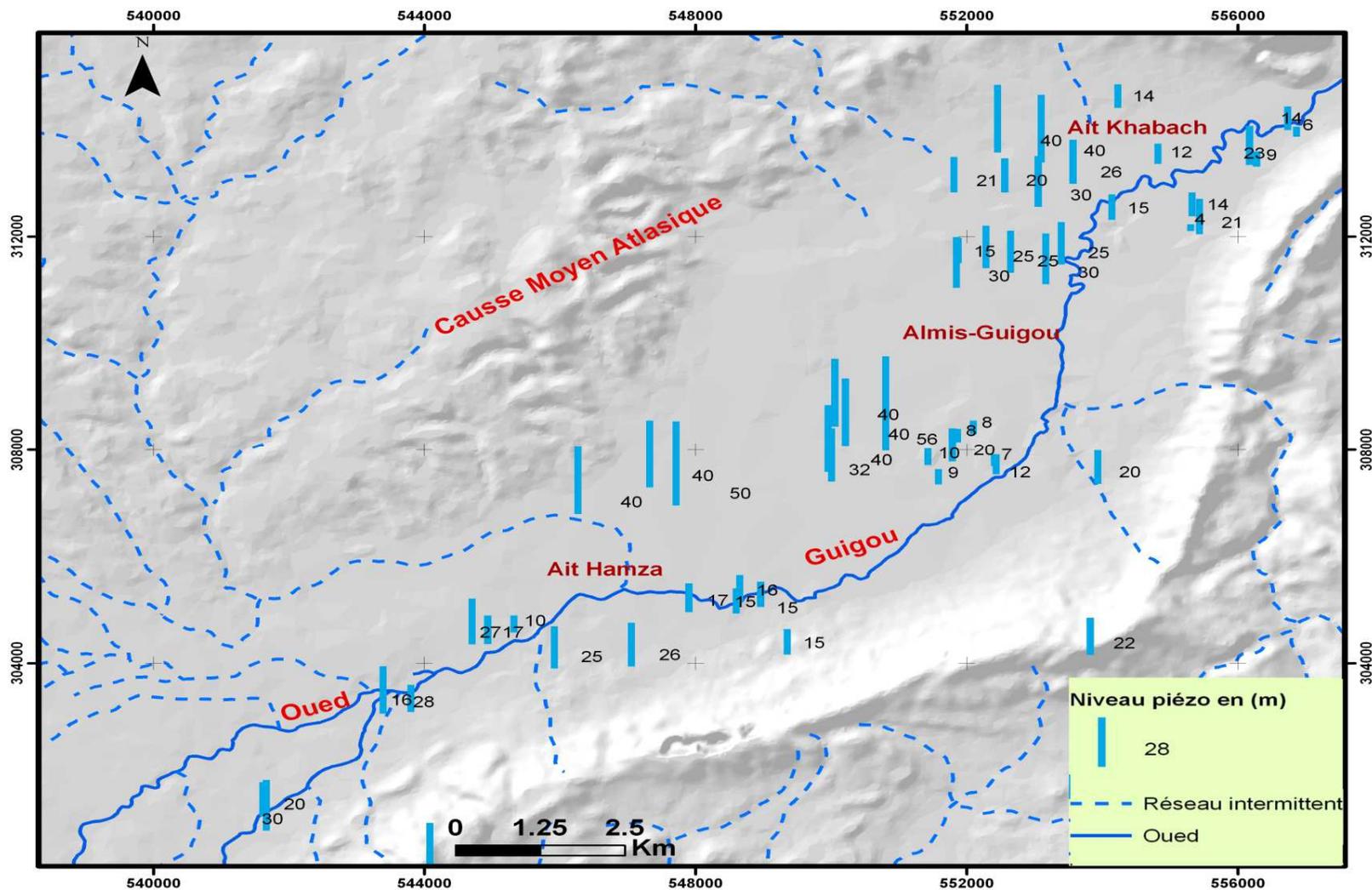
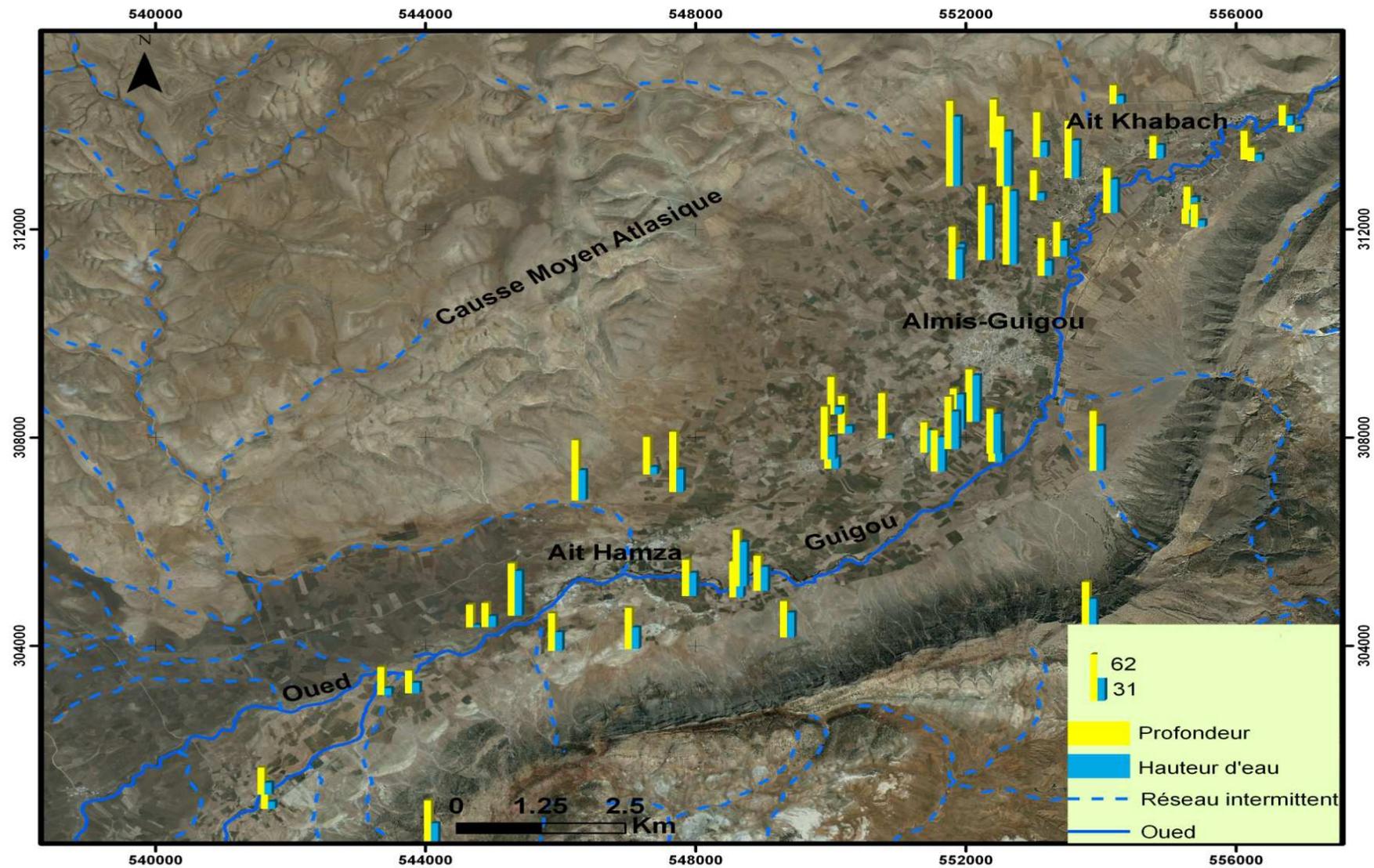


Figure 9.27 : Profondeur des puits et hauteur d'eau relevée en mai, 2012.



5-Réaménagement et modernisation

La modernisation des périmètres irrigués est devenue une réponse appropriée et vitale pour développer l'agriculture (Ait Amour, 2004) et rationaliser la gestion de la ressource en eau. A cet égard, le Plan Maroc Vert subventionne la création de nouvelles plantations (5000dh/ha : avec le système gravitaire et 6000dh/ha avec la technique de goutte à goutte). Malheureusement, seulement 10% des agriculteurs ont bénéficié de ce programme. Dans le Haut Sebou, les aspects de la modernisation se manifestent par l'introduction modeste de quelques techniques sophistiquées comme le goutte à goutte.

5-1 Remplacement des cultures moins consommatrices en eau

Devant la pression sur les ressources en eau et l'intensification des cultures, il est nécessaire de réaliser des économies d'eau en luttant contre la faible efficacité des systèmes d'irrigation et en recommandant des choix de cultures moins consommatrices. En effet, lors de l'enquête plus de la moitié des enquêtés (fig.9.28) prévoit de remplacer les types des cultures existantes par d'autres cultures moins consommatrices en eaux comme l'arboriculture. A cet égard, l'état a lancé des programmes de subventions pour remplacer les cultures les plus consommatrices d'eau comme les céréales, par des cultures adaptés avec le climat de la région. Mais seulement 10 % des enquêtés (fig.9.29) ont bénéficié de ces subventions Ce chiffre modeste est lié à plusieurs raisons, comme par exemple le fait que l'information ne soit pas connue par les paysans; C'est le fait pour 46% des enquêtés.

La majorité des subventions a été utilisée pour faire de l'arboriculture. Cette modernisation est visible surtout par l'extension spectaculaire des rosacés (essentiellement pommiers, cerisiers et poiriers). Elle est le fait soit de reconversions par les locaux comme c'est le cas dans la cuvette de Zloul soit de nouvelles plantations grâce à des investissements conséquents des étrangers à la région ; Il s'agit surtout de capitaux d'origines citadines (Fès, Meknès...) (Tag, 1996)

Figure 9.28 : Remplacement des cultures consommatrices d'eau par des cultures moins consommatrices en eaux.

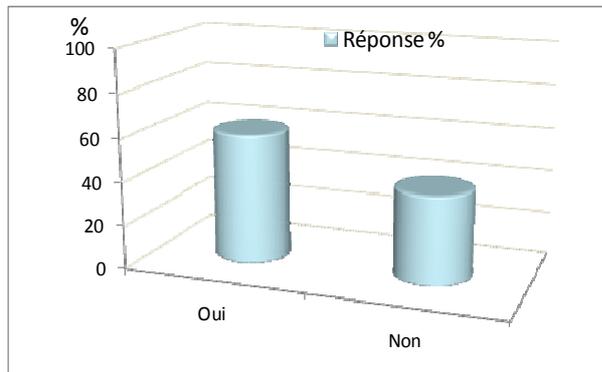


Figure 9.29 : Les agriculteurs bénéficiant des subventions étatiques pour la création de nouvelles plantations.

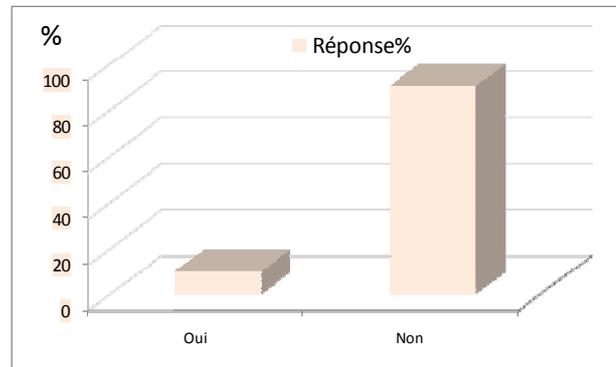


Planche photos 10.4. La plantation de nouvelles cultures soutenues dans le cadre de PMA



5-2 La technique du goutte à goutte

Si les plaines et les grands périmètres ont déjà connu l'extension des techniques d'irrigation économes en eau comme l'irrigation au goutte-à-goutte, les zones montagnardes connaissent un retard remarquable en la matière. Ce retard dans le Haut Sebou est notamment lié à la dispersion et à la taille réduite des parcelles considérées par les propriétaires comme un frein au développement et à la modernisation de leurs exploitations agricoles. En effet, d'après l'enquête sur le terrain, seulement 19% des agriculteurs ont mis en place la technique du goutte à goutte sur leurs parcelles (fig.9.30).

Figure 9.30 : Part de la technique de goutte à goutte.

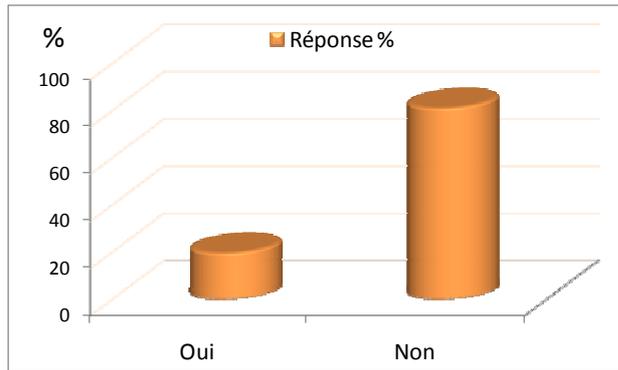


Figure 9.31 : Part des agriculteurs qui prévoient la mise en place de la technique de

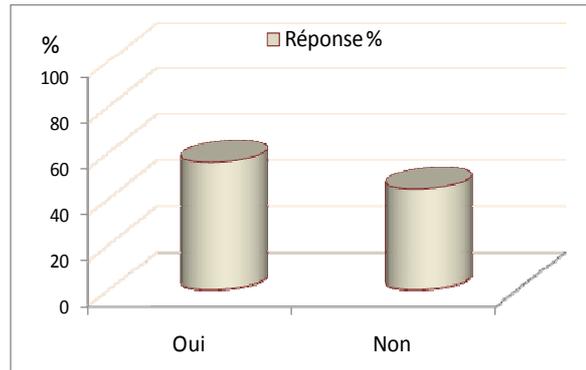


Planche photos 10. 5 : L'irrigation par la technique d'aspersion



Planche photos 10.6. Equipements de la technique de la goutte à goutte à Guigou



En outre, il a été demandé aux agriculteurs de citer les principales contraintes empêchant la mise en place de la technique de goutte à goutte. Pour les 2/3 d'entre eux c'est l'absence de moyens qui constitue le facteur principal (fig.9.31). Le deuxième frein à l'introduction de cette technique identifié par 34 % des agriculteurs, est la superficie réduite et éparpillée des parcelles. Une grande part des puits et des forages est creusé sans autorisation, mais depuis ces dernières années les autorités l'exigent avant le creusement. Dans ce sens, les

agriculteurs confirment la complexité de procédure d'octroi d'autorisation de creusement de puits et de réalisation des forages.

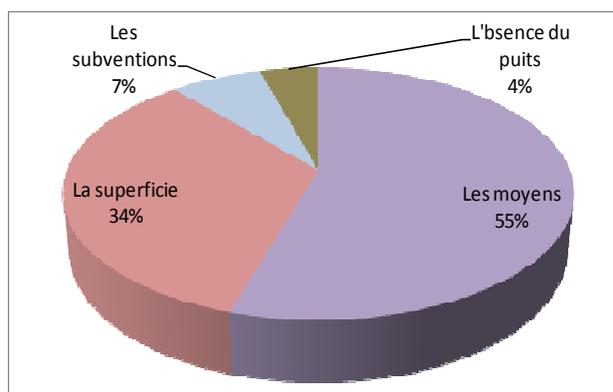


Figure 9.32 : Les principales contraintes de l'utilisation du goutte à goutte comme technique d'irrigation

Conclusion du chapitre 9

Au terme de cette étude, il apparaît que la problématique de la gestion des ressources en eau se pose avec intensité dans le bassin versant du Haut Sebou. En effet cette étude in situ a permis de quantifier, d'une certaine façon, la pression croissante sur les ressources en eau dans ce territoire montagnard. Cette pression s'exerce sur l'eau de surface via un dense réseau de seguias en terre à partir duquel des pertes par évaporation et infiltration contribuent au gaspillage de la ressource en eau.

En outre, la pression sur la ressource souterraine est également conséquente du fait de nombreux pompages à partir des nappes exercés durant toute la saison sèche. Elle a montré aussi l'hétérogénéité spatiale du foncier, des cultures et du cycle d'irrigation entre l'amont et l'aval du bassin versant. Par ailleurs, la modernisation de la gestion des ressources en eau bien qu'amorcée est encore très faible. Cette faiblesse est liée à des contraintes d'ordre matériel dans la mesure où les agriculteurs ont majoritairement pris conscience de la faible efficacité de mode traditionnelle d'irrigation.

En outre, la plaine de Guigou présente un cas représentatif en matière de gestion des ressources en eau dans le bassin versant Haut Sebou. Il exprime aussi les mutations et les changements du comportement culturel d'une part, et la volonté des paysans pour l'amélioration des performances des périmètres irrigués d'autre part.

Enfin, si la gestion traditionnelle de l'eau a montré la sagesse des ayants droits en matière de partage et de répartition de cette ressource, les défis actuels exigent de revoir ces pratiques ancestrales, et de les adopter à la vie moderne tout en intégrant la dimension de durabilité

Conclusion de la troisième partie

Le bilan démographique au sein du bassin versant semble être satisfaisant. L'évolution démographique est marquée par une stagnation voire une diminution de la population rurale et par une croissance de la population urbaine. Cependant la répartition spatiale de cette dernière est très hétérogène. On note une forte concentration dans les cuvettes et le long des oueds qui a induit des mutations au niveau des activités exercées et des modes d'occupation de l'espace et l'intensification des activités agricoles. Ces activités constituent une pression qui ne cesse d'augmenter sur la ressource en eau.

Depuis longtemps la politique d'irrigation au Maroc a permis de lutter contre l'aridité et d'atténuer les vicissitudes du climat. Elle a permis ainsi de mettre en place une infrastructure hydraulique importante (barrages, seguias...). En effet ce domaine a bénéficié d'efforts remarquables de l'état en termes d'investissements, de programmes, de textes législatifs...

Par ailleurs, les transformations qu'a connues le Moyen Atlas, marquées par un passage du semi-nomadisme et de transhumance à une mode de sédentarisation progressive, ont modifié les modes d'occupation du sol. Ces bouleversements ont touché le régime foncier, l'élevage et les dynamiques agraires. Ces dernières ont conduit à l'intensification des cultures et à l'élargissement des surfaces agricoles. Cependant, le changement de comportement culturel a conduit à une pression sur la ressource en eau superficielle et souterraine qui ne cesse de croître.

L'enquête menée sur le terrain a permis de mettre en évidence les pratiques des agriculteurs vis-à-vis de l'eau d'irrigation. Il apparaît que la gestion de l'eau d'irrigation repose encore très largement sur un mode traditionnel archaïque contribuant au gaspillage de la ressource. L'introduction de cultures consommatrices a engendré un déficit structurel entre l'offre en eau superficielle et les besoins. Cette situation a poussé les agriculteurs à combler ce manque par l'utilisation des eaux souterraines. L'enquête a démontré et partiellement quantifié la pression exercée sur la nappe à cause du surpompage.

Partie IV

La modélisation

Introduction de la quatrième partie

L'analyse hydrologique (2^{ème} partie), tant au niveau des modules que des phases hydrologiques a permis de caractériser deux processus hydrologiques fondamentaux à l'œuvre dans les bassins versants : les crues et la vidange des aquifères. Néanmoins cette caractérisation repose sur des épisodes particuliers non reliés entre eux ; La représentation que l'on a du fonctionnement du bassin versant du Haut Sebou est donc discontinue et partielle. Or la réalité complexe du fonctionnement d'un bassin versant peut être représentée par des modèles hydrologiques. En effet, l'utilisation de ces modèles permet de simuler l'évolution conjointe des termes du bilan de l'eau dans chaque compartiment du cycle de l'eau (ETR, la réserve dans le sol et le sous-sol, et le débit des cours d'eau...). Dans cette partie nous envisageons donc la modélisation de la relation pluie/débit à l'échelle mensuelle dans le but d'inscrire toutes nos observations dans une représentation cohérente du fonctionnement hydrologique des bassins versants du Haut Sebou aux stations hydrométriques.

Dans un premier temps après la présentation d'une typologie des modèles hydrologiques nous exposons les considérations qui ont prévalu aux choix de modèles déterministes conceptuels. Ensuite nous en présentons l'architecture et leur mode de fonctionnement.

Dans un second temps nous exposons les choix opérés sur les données et les paramètres, la mise en œuvre et les résultats des modélisations.

**** Chapitre 10 : La présentation du modèle et quantification des variables et paramètres**

Sommaire

Introduction

I- La modélisation Hydrologique : considérations théoriques

1- Définitions

2- Intérêt et enjeux de la modélisation

3- Les types de modèles hydrologiques

4- Choix d'un modèle

II-Les étapes de la mise en œuvre d'un modèle hydrologique

1- Préparation des données d'entrée

2- Calage du modèle

3- Validation du modèle

III-Les modèles retenus pour le Haut Sebou

1-Justification et choix des modèles

2-Structure du modèle ORCHY

3-Structure du modèle GR2M

Conclusion

Introduction du chapitre 10

Il existe une très grande quantité et diversité de modèles hydrologiques, Ambroise (1998) n'hésite pas à dire "qu'il y a presque autant de modèle que d'hydrologue" ; Ce chapitre vise donc à donner un éclairage sur les type et les pratiques de modélisation avant d'exposer notre choix de modèle. Dans un premier temps nous exposons les considérations théoriques qui ont prévalu aux choix des deux modèles hydrologiques mis en œuvre sur le Bassin du Haut Sebou. Dans un deuxième temps nous présentons l'architecture des modèles ainsi que les jeux de données et paramètres nécessaires à leur mise en œuvre.

I- La modélisation Hydrologique : considérations théoriques

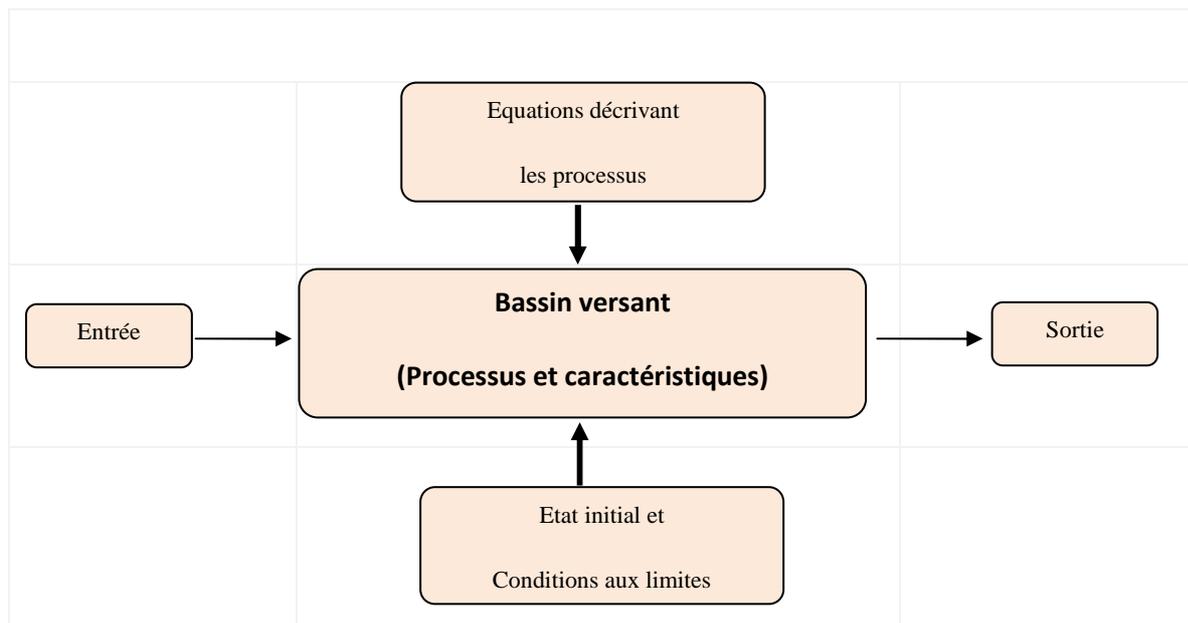
1- Définitions

Le terme modèle voit s'attribuer de nombreuses définitions. D'après le Glossaire International d'Hydrologie, le modèle est une "Représentation sous une forme quelconque d'un objet, d'un processus ou d'un système. Cependant, le Trésor de la Langue Française donne la définition suivante: Système physique, mathématique ou logique représentant les structures essentielles d'une réalité et capable à son niveau d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le fonctionnement (Birou, 1966, in Thietart, 2014). Par ailleurs, le Dictionnaire de l'environnement définit un modèle comme une "Représentation simplifiée, relativement abstraite, d'un processus, d'un système, en vue de le décrire, de l'expliquer ou de le prévoir".

En science hydrologique le concept de « modèle » apparaît vers les années cinquante (Mouelhi, 2003). Dans ce cadre un modèle est la plupart du temps une représentation mathématique d'un bassin, d'un système d'eau, d'une série de données... (Glossaire International d'Hydrologie, 1992). On peut également faire référence à la définition suivante proposée par le Dictionnaire français d'Hydrogéologie : "toute représentation théorique simplifiée d'un système aquifère : elle comporte la définition d'une structure, la formulation de lois (relations déterministes ou probabilistes) reliant les impulsions ou entrées du système à ses réponses ou sorties, et la définition des paramètres (constantes ou variables pouvant prendre des valeurs numériques) entrant dans ces relations. Un modèle peut être de différente nature : déterministe, stochastique ou statistique par exemple. Il peut être également conceptuel ou empirique. Enfin du point de vue spatial un modèle peut être global ou distributif.

En définitive la modélisation hydrologique désigne la représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelle et spatiale correspondant à celles que l'on observe dans la nature (Mouelhi, 2003. Chow et al., 1988 ; Payraudeau, 2002). Il s'agit d'une des méthodes qui permet de répondre aux enjeux liés à la prédétermination des variables hydrologiques ou à leur prévision (Hingray et al., 2009).

Figure 10.1: Composants d'un modèle d'après (Singh, 1995)



2- Intérêt et enjeux de la modélisation

Devant la pression croissante sur les ressources en eau, la préoccupation principale réside dans la planification efficace pour garantir la gestion durable de la ressource. Mais la réalisation de cet objectif se heurte à une difficulté majeure liée aux lacunes importantes portant sur les connaissances de base des ressources en eau. Afin de combler ces lacunes, les modèles hydrologiques sont parmi les outils disponibles permettant d'acquérir une compréhension adéquate des caractéristiques du bassin versant (Tessema, 2011). Il s'agit donc d'essayer d'améliorer les connaissances sur le comportement des systèmes hydrologiques par la modélisation dynamique des processus en question ajoute Hingray et al., (2009).

Par ailleurs, l'intérêt des modèles hydrologique se trouve dans leur capacité d'appréhender et de représenter les multiples processus maitrisant le comportement hydrologique du bassin versant. La complexité des processus intervenant dans le cycle de l'eau, à laquelle s'ajoute celle de leurs interactions, rend en effet la modélisation cruciale dès lors que l'on souhaite extrapoler les mesures de terrain, tant temporellement que spatialement (Le Lay, 2006).

En fait, à coté de la prévision et prédiction de la quantité et de la qualité de l'eau, la modélisation hydrologique peut aider à prédire les comportements futurs et les impacts des changements naturels et anthropiques sur les ressources en eau et également à quantifier la disponibilité spatiale et temporelle des ressources (Tessema, 2011). Hingray et al., (2009) insistent sur les enjeux opérationnels de la modélisation pluie débit. Cette méthode permet de disposer des outils qui permettent d'estimer par simulation la réponse hydrologique d'un hydrosystème à une sollicitation donnée. Les simulations ont de multiples intérêts comme, par exemple, de disposer de scénarios hydrologique nécessaires à la gestion de la ressource en eau et des risques hydrologiques (crues, étiages...). Outre ces visées opérationnelles, dans notre cas le premier intérêt de la modélisation est la mise en cohérence de l'ensemble des paramètres et variables produits à partir des méthodes déployées dans le cadre de l'hydrologie analytique.

3- Les types de modèles hydrologiques

Il existe dans la littérature de nombreux modèles hydrologiques ayant chacun leur spécificités et leurs domaines d'application (Decharme, 2005 ; Perrin, 2000). Devant cette diversité, plusieurs auteurs en ont proposé une classification. Les classifications varient selon le point de vue adopté ; Par exemple, Singh (1995, in Boudhar, 2009) a proposé trois critères pour classer les modèles hydrologiques. Ces critères sont la description des processus, l'échelle spatio-temporelle et la méthode utilisée pour résoudre les équations. Cependant, Refsgaard (1997) distingue les modèles hydrologiques selon la description des processus physiques, conceptuels ou physiques, et selon la description spatiale des processus au niveau du bassin versant, globale ou distribuées.

En nous appuyant sur la classification classique adoptée par Pierre et al., (2012). On peut citer les modèles suivants :

- **Les modèles à base physique** : décomposent les mécanismes internes d'un système en se basant sur la discrétisation du milieu à partir des lois physiques. Les phases du cycle de l'eau sont donc exprimées selon ces lois (Lang, 2007)
- **Les modèles empiriques** : se proposent d'établir des relations entre les variables d'entrée et les variables de sortie à l'aide d'un ensemble d'équations d'enveloppée et ajustés sur la base des données obtenues sur le système (Hingray et al., 2009).
- **Les modèles conceptuels** : d'après le Glossaire international de l'hydrologie ces modèles sont utilisés pour simuler le comportement d'un bassin. Ils n'ont pas besoin des lois physiques. La simulation se base sur la connaissance préalable du comportement du bassin.

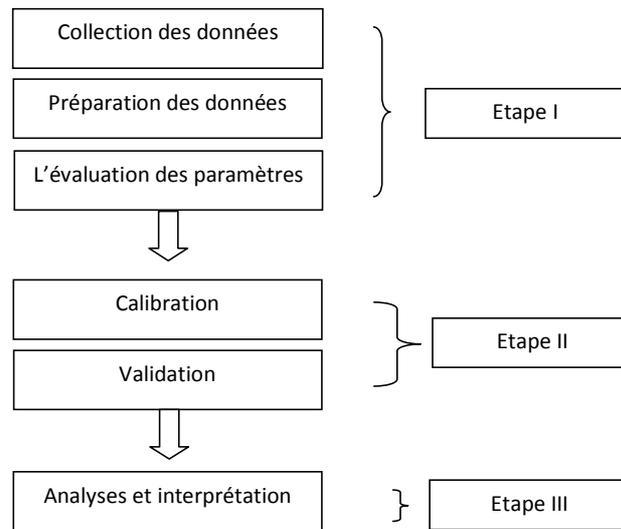
4- Choix d'un modèle

Le choix de tel ou tel modèle reste toujours une étape sensible même si certains mécanismes et processus ont été mis en évidence par l'analyse des phases hydrologiques notamment. En effet, d'après la communauté hydrologique le « meilleur » modèle n'existe pas, tout dépend en fait des objectifs et du contexte de l'étude. D'après Laurent (2010) le choix d'un modèle doit prendre en considération les points suivant :

- il doit être fondé sur les besoins
- quel résultat veut-on obtenir ?
- à quelle précision
- avec quelle fiabilité ?
- mais aussi sur la disponibilité des données, parce que les bassins versants instrumentés sont rares.

II-Etapes de la mise en œuvre d'un modèle hydrologique

D'après Hingray et al., (2009), dans toute démarche de modélisation, il est fondamental d'identifier, avant toute chose, l'objectif et le cadre de la modélisation, à savoir : l'hydrosystème et la nature des phénomènes hydrologiques à modéliser, les données disponibles pour décrire le milieu et les variables hydro-météorologique d'intérêt.

Figure 10.2 : Etapes de la construction d'un modèle hydrologique

1- Préparation des données d'entrée

Il est utile de rappeler que les modèles hydrologiques peuvent fonctionner pour différents pas de temps, selon l'objectif de simulation ; par exemple dans le cas des modèles de prévision qui s'intéressent à l'analyse des crues urbaines, le pas de temps peut être infra-horaire. Tandis qu'il peut être journalier, mensuel, voire annuel quand il s'agit des modèles de la gestion de la ressource en eau à l'échelle d'un grand bassin versant. Les progrès effectués dans les techniques d'observation de la terre par télédétection ont bien servi la modélisation hydrologique. Ces techniques permettent actuellement d'appréhender le caractère spatial des variables qui définissent le comportement hydrologique des bassins versants (variables climatologiques ou météorologiques, types de sol, types de végétation, état de surface ou état hydrique du sol....) (Chakir, 1994).

Dans ce travail les entrées du modèle se résument aux précipitations (P), l'évapotranspiration (ETP) et le débit Q. Ces variables climatiques ont fait l'objet d'une analyse préalable. En effet, la quantification spatiale mensuelle de la pluie a constitué une étape nécessaire pour la mise en œuvre du modèle. Les données d'évapotranspiration ont également fait l'objet de spatialisation en se basant sur l'équation du gradient thermique et un modèle numérique de terrain (MNT). Le coefficient d'écoulement de crue est calculé aussi à partir de la décomposition des hydrogrammes de crues.

2- Calage du modèle

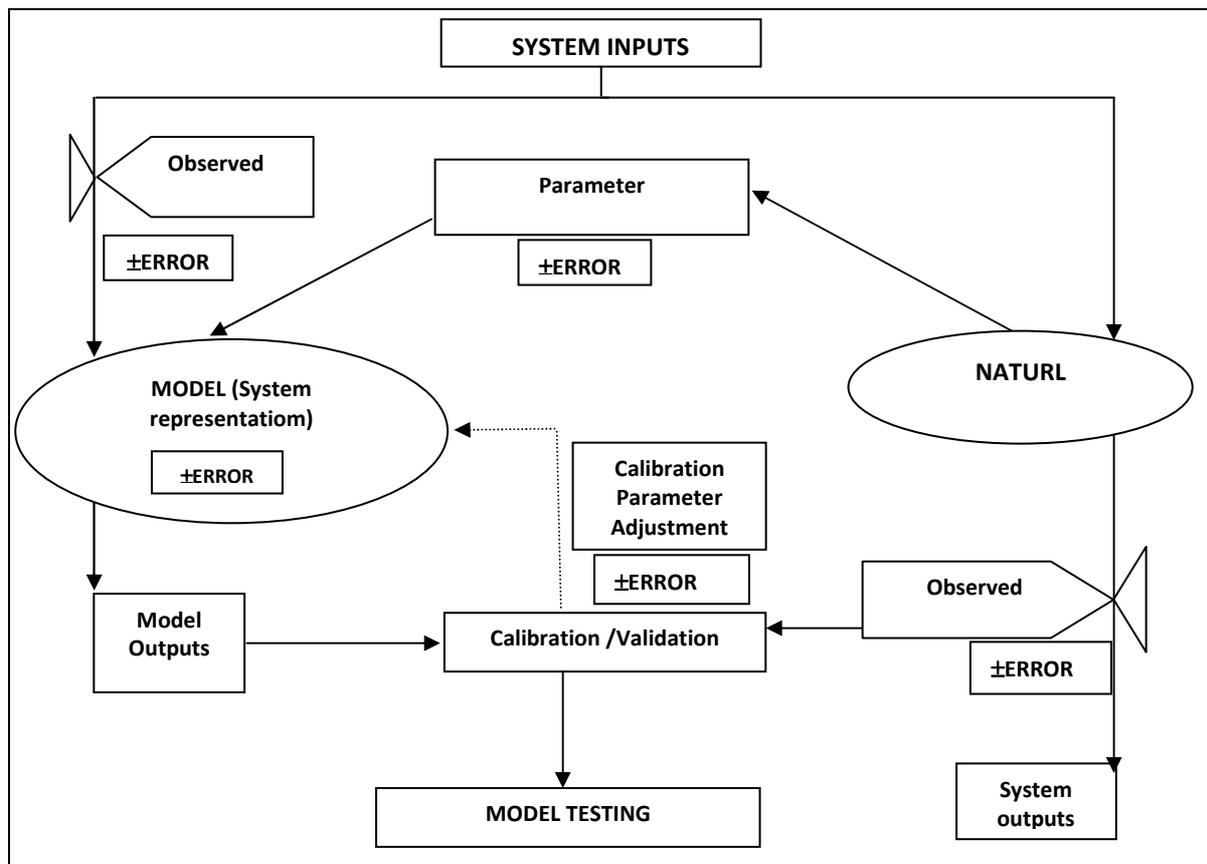
D'après Marchandise (2007), Le calage d'un modèle consiste à déterminer, sur un échantillon d'événements de référence, un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence. L'objectif de cette étape est de réduire les écarts entre débits simulés et débits observés.

3- Validation du modèle

La phase de la validation du modèle vise à s'assurer qu'il donne une représentation raisonnable de la réalité. Il s'agit de la comparaison des résultats du modèle numérique avec des données obtenues de façon indépendante à partir d'expériences ou observations de l'environnement (Duda et al., 2012).

Le schéma ci-dessous (Fig, 10.3) récapitule le processus de la mise en œuvre d'un modèle hydrologique.

Figure 10.3. Modèle par rapport au système naturel: Entrées, sorties, et les erreurs. (Duda et al., (2012).



II- Les modèles retenus pour le Haut Sebou

1- Justification et choix des modèles

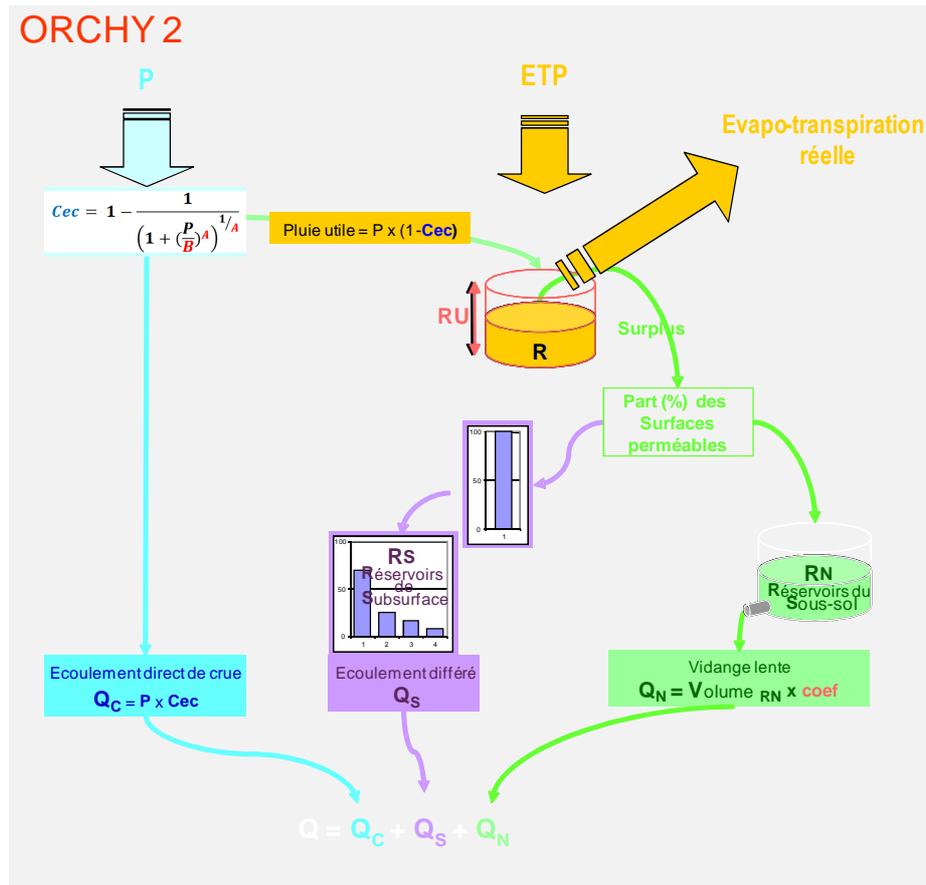
Compte tenu des variables d'entrée dont nous disposons, à savoir les données climatiques, le modèle doit être au pas de temps mensuel. D'autre part, bien que nous ayons quelques données de débits à une échelle spatiale plus fine que les bassins globaux, elles ne permettront ni calage, ni validation. La deuxième considération que nous prenons en compte dans notre choix relève des 2 objectifs de cette modélisation. Le premier à trait à la connaissance du bassin. En effet même si la partie « hydrologie analytique » nous a permis de mettre en évidence et de quantifier certaines composantes de la relation pluie/débit il nous paraît néanmoins nécessaire de tester leur cohérence. En cela, le modèle, par sa routine et son calage, nous permettra d'apprécier le degré de cohérence des phénomènes quantifiés. Dans un deuxième temps, si le premier objectif est atteint, le modèle nous permettra d'envisager l'impact des modifications du forçage climatique sur les écoulements. La troisième justification moins « scientifique » est pragmatique ; Elle renvoie au côté pratique de la mise en œuvre et aux « habitudes » de modélisation dans l'environnement dans lequel la thèse a été préparée.

Notre choix s'est porté sur deux modèles conceptuels à réservoirs. En effet, « les recherches menées sur de nombreux bassins ont conduit à considérer tout bassin versant comme un système complexe, dans lequel les précipitations se répartissent entre plusieurs niveaux de stockage temporaire en interaction, avant de retourner dans l'atmosphère par évapotranspiration ou d'être évacuées hors des limites du bassin par écoulement dans les cours d'eau et les nappes » (Ambroise, 1998). D'autre part, les modèles conceptuels répondent à nos préoccupations de représentation du cycle hydrologique, parce qu'il « intègre les facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple..... » et « bien que réducteur, il a l'avantage d'introduire une référence physique » (Makhlouf, 1994) ». Le premier modèle retenu est nommé "**O**util de **R**éprésentation du **C**ycle **H**ydrologique" (ORCHY) élaboré au sein du laboratoire LOTERR. Le second est le modèle mis au point par le **G**énie **R**ural, à **2** paramètres et aux pas de temps **M**ensuel (GR2M).

2- Structure du modèle ORCHY

Le modèle ORCHY, (Outil de Représentation du Cycle HYdrologique), élaboré au LOTERR (CEGUM auparavant) d'après Thornthwaite & Mather. Il comporte trois réservoirs : un réservoir sol caractérisé par la réserve utile et à partir duquel s'effectue le bilan hydrique et deux réservoirs sous-sol qui restitue l'eau infiltrée au réseau hydrographique (fig.10.4).

Figure 10.4 : Architecture du modèle d'OrchHy2 (Gille, 2003)



Le premier étage du modèle assure la fonction de production, c'est-à-dire la conversion de la pluie brute en pluie nette. Cette fonction cherche donc à représenter l'interaction des précipitations avec le sol pour fixer la part des pluies qui ruisselle directement de celle qui s'infiltré dans le sol. Dans le modèle ORCHY la fonction de production est assurée par une équation d'ERC issus de la formulation de Turc : $Q_{crue} = P - \frac{P}{[c + (P/B)^A]^{1/A}}$

Les valeurs de A et de B peuvent être ajustées en fonction des saisons.

La fonction de transfert, permettant de générer l'hydrogramme de crue à partir des précipitations nettes, est assurée par 3 réservoirs en cascade dont le premier sert à une

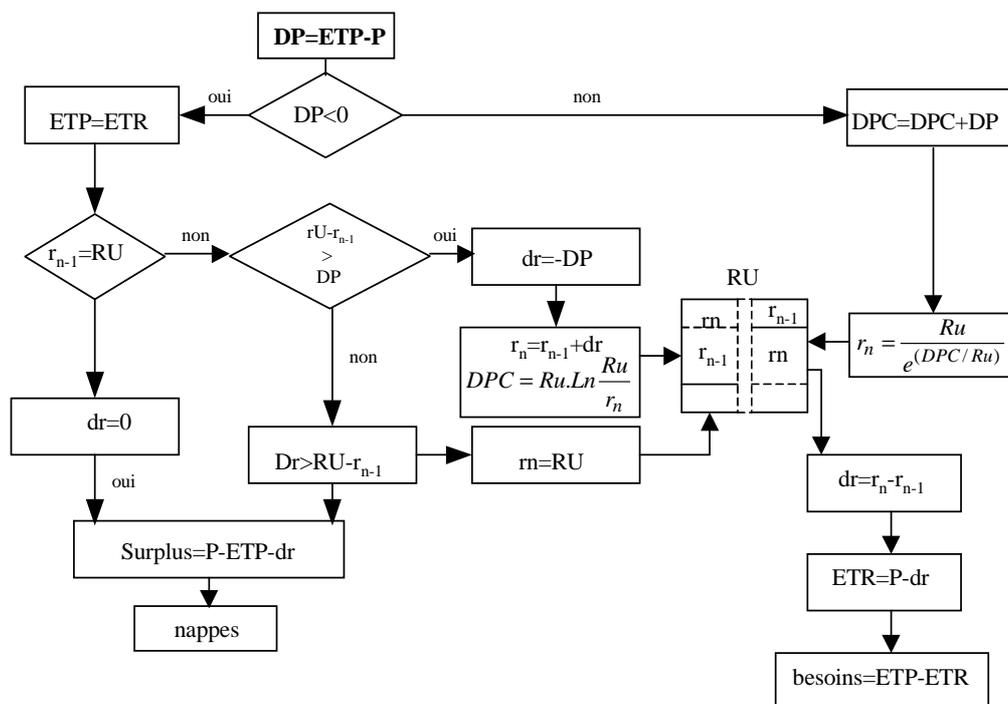
représentation du bilan hydrique. Il s'agit d'un réservoir sol caractérisé par sa réserve utile (Ru) maximale. Dimensionnée en mm par calage, elle est la base du bilan hydrique. La variation de la réserve utile est assurée par une approche agro-climatique du bilan hydrique. Cette approche se décompose en trois phases (Riou, 1975) :

-phase 1 : $P < ETP$ alors $ETR = P - ERC$, toute la pluie est utilisée par l'évapotranspiration, la pluie est le facteur limitant.

-phase 2 : $P > ETP$ alors $ETR_{max} = ETP$, c'est l'énergie fournie par le climat qui est le facteur limitant.

-phase 3 : $P < ETP$ alors ETR obéit à la loi qui traduit l'effort croissant pour extraire l'eau de la réserve du sol au fur et à mesure que celle-ci s'assèche: $ETR/ETP = \exp[-(1/Ru) \int ETP \cdot dt]$ avec Ru étant la réserve en eau du sol. Dans ce cas, c'est la réserve en eau du sol qui est le facteur limitant. Thornthwaite considère que la dernière équation peut être ramenée à une variation géométrique de l'eau dans le sol. Pour cela il a introduit la notion de déficit pluviométrique cumulé qui rend compte de « ETP.dt », procédé qui est utilisé pour calculer l'ETR dans la situation correspondant à la troisième phase.

Figure 10.5 : Algorithme du bilan hydrique



Cette approche du bilan hydrique est présentée sous la forme d'un algorithme (fig.10.5). Les sorties du bilan hydrique sont l'ETR et le surplus. Ce dernier constitue l'infiltration vers le souterrain.

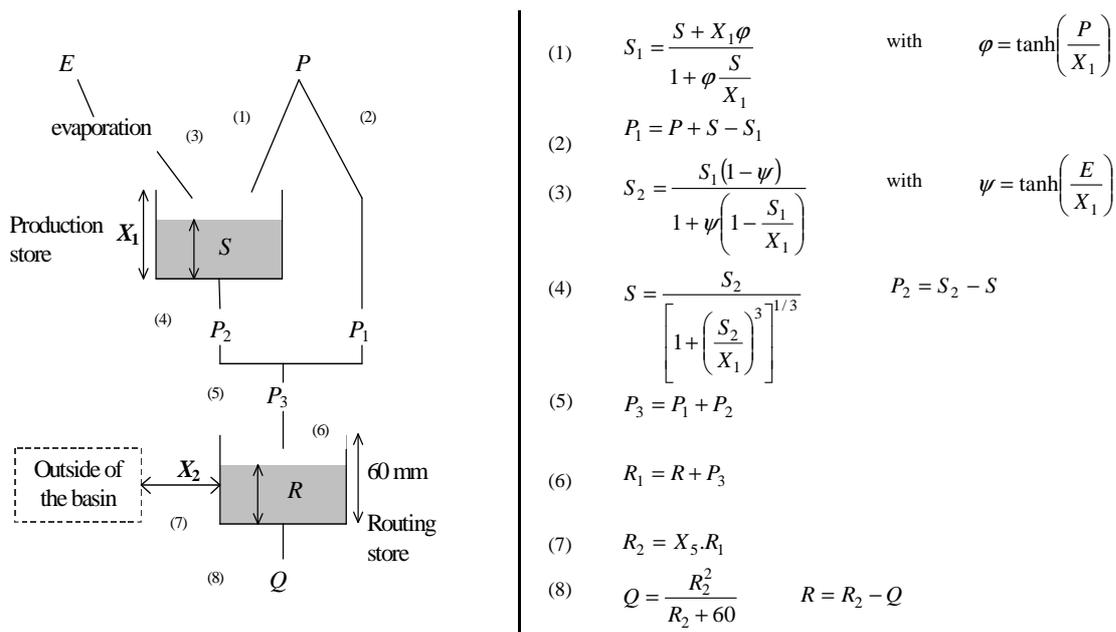
L'écoulement souterrain est régi par deux réservoirs traduisant l'hétérogénéité des lithologies rencontrées dans les bassins versants. Un réservoir dit de sub-surface rend compte des écoulements en macropores de transit rapide mais néanmoins différés. Un second réservoir traduit le fonctionnement d'une nappe au sein d'un aquifère plutôt de type poreux (micropores). Pour ce cas il y a donc constitution d'une recharge par une partie du "surplus" et un transfert plus ou moins lent au réseau hydrographique gouverné par un coefficient de vidange.

Il y a également d'autres paramètres d'ajustement pour tenir compte des erreurs systématiques dans la détermination des pluies ou de l'ETP par l'attribution d'un coefficient correcteur. Il est également possible de tenir compte de transferts hors bassin.

Donc globalement ce modèle présente une grande souplesse d'utilisation et présente également comme avantage de pouvoir substituer aux paramètres de calages des valeurs issues de l'hydrologie analytique telles que le coefficient de tarissement ou les coefficients d'écoulement rapide de crue (cf. chapitre 5).

3- Structure du modèle GR2M

C'est un modèle conceptuel global à 2 paramètres dont les entrées sont les données mensuelles de précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP). Nous avons utilisé la version "excel" téléchargée sur le site de l'IRSTEA (Institut national de recherches en sciences et technologie pour l'environnement et l'agriculture) de Mouelhi (2003) et Moulehi et al., (2006).

Figure 10.6 : Architecture du modèle GR2M

$$(1) \quad S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \text{with} \quad \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

$$(2) \quad P_1 = P + S - S_1$$

$$(3) \quad S_2 = \frac{S_1(1 - \psi)}{1 + \psi \left(1 - \frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{with} \quad \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right)$$

$$(4) \quad S = \frac{S_2}{\left[1 + \left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad P_2 = S_2 - S$$

$$(5) \quad P_3 = P_1 + P_2$$

$$(6) \quad R_1 = R + P_3$$

$$(7) \quad R_2 = X_5 \cdot R_1$$

$$(8) \quad Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad R = R_2 - Q$$

Ce modèle est caractérisé par une fonction de production et une fonction de transfert dont les paramètres sont à optimiser. Ce modèle s'articule autour de deux réservoirs : un réservoir "Sol" caractérisé par sa capacité maximale A et un réservoir quadratique de routage caractérisé par sa capacité B (Mouheli, 2003).

Il n'est pas possible dans ce modèle d'établir une relation directe entre ses paramètres et les valeurs obtenues au cours de l'analyse des phases hydrologiques comme c'est le cas pour le modèle ORCHY.

Conclusion du chapitre 10

Ce chapitre nous a permis de faire le point sur les différents types de modèle existant ainsi que sur toute la chaîne de mise en œuvre d'une modélisation hydrologique. Il est apparu que compte tenu du pas de temps auquel nous disposons des variables d'entrée, deux modèles pouvant accomplir l'objectif de mise en cohérence des valeurs caractéristiques de l'hydrologie du Haut Sebou calculées sont ORCHY et GR2M. Tous les deux sont des modèles conceptuels globaux.

**** Chapitre 11 : Mise en œuvre des modèles**

Sommaire

Introduction

I-Les jeux de données et paramètres de calage disponibles

1-Les données d'entrée du modèle : les variables climatiques

2-Les paramètres de calage

II-Les critères de validation

III-Mise en œuvre et résultats du modèle GR2M

1-Les enseignements de la modélisation GR2M

IV-Mise en œuvre et résultats du modèle ORCHY

V-Les résultats

Conclusion

Introduction du chapitre 11

Les modèles ORCHY et GR2M, comme tous les autres modèles, permettent une interprétation de la réalité dans un cadre conceptuel reposant sur des simplifications, des approximations de la réalité. D'autre part « le lien entre le modèle et le monde réel repose sur les données qui caractérisent ce dernier » (Perrin, 2000). En préalable à l'exposé de la mise en œuvre et des résultats nous rappelons donc les données utilisées disponibles, leur source ainsi que les paramètres de calage mesurés possibles.

I- Les jeux de données et paramètres de calage disponibles

1- Les données d'entrée du modèle : les variables climatiques

Les données de précipitations ont été obtenues par l'application de la méthode d'interpolation de l'inverse distance au carré sur 22 postes. Les résultats de cette interpolation sont correctes puisque entachés d'une incertitude de l'ordre de 18 à 20%. Ces données sont disponibles sur la chronique 1974-2010 au pas de temps mensuel.

Les données concernant l'évapotranspiration sont de deux types. Pour l'ETP nous disposons des valeurs calculées selon la formulation de Turc (1962) sur 3 stations climatiques situées sur les marges du bassin et extrapolées sur l'ensemble du bassin à partir du gradient thermique ; Ces valeurs sont disponibles sur la période 1974-2003. Nous disposons également des valeurs d'ETP dérivées des mesures du satellite Modis. Ces dernières largement supérieures à l'ETP calculée selon Turc pourront être comparées dans le cadre de la modélisation.

3- Les paramètres de calage

Dans le modèle ORCHY les paramètres de calage sont les coefficients de vidange de nappe mensuel "Cv" et de ruissellement mensuel "Cr". Ces deux paramètres sont à rapprocher des valeurs déterminées par l'analyse des hydrogrammes.

En effet, le coefficient de ruissellement mensuel peut être assimilé à la moyenne mensuelle des coefficients d'ERC calculée par la méthode de séparation des écoulements (chapitre 5). Ces derniers peuvent donc être directement injectés dans le modèle en remplacement des coefficients "Cr" déterminés par la formule de Turc.

D'autre part les coefficients de vidange de nappe mensuel "Cv" sont à rapprocher des valeurs de coefficients journaliers de tarissement α déterminées par l'analyse des phases

hydrologiques. La conversion de ce dernier en coefficient de vidange mensuel se fait de la façon suivante :

$$Cv_{journalier} = 1 - e^{-\alpha}$$

et
$$Cv_{mensuel} = 1 - (1 - Cv_{journalier})^{30}$$

Les valeurs de C_v mensuel sont dans le tableau suivant :

Tableau 11.1 : Valeurs du coefficient de vidange mensuel de nappe en pourcent

%	Azzaba	Pont de Mdez	El Mers	Aït Khabach
Cv mensuel	30	76	71	77

4- Les critères de validation

La validation consiste en la confrontation des débits produits par le modèle avec ceux mesurés aux stations, en gardant un œil critique sur les paramètres de calages et les autres paramètres d'ajustement tels les transferts, les surfaces imperméables, les coefficients correcteurs des données d'entrée...

Une première validation d'ordre qualitative est une appréciation visuelle des hydrogrammes produits par le modèle avec ceux mesurés juxtaposés.

Une deuxième validation, quantitative, détermine objectivement la pertinence de la modélisation. Nous utilisons une régression ainsi que le critère de Nash dont l'équation est la

suivante :
$$N = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2} \right]$$

Lorsque N est supérieur à 60 le modèle peut être considéré comme valide, et d'autant plus que la valeur s'approche de 100.

Nous utilisons également les régressions linéaires entre débits observés et débits produits par le modèle pour valider ou non le modèle.

Le modèle ORCHY utilise la "RMSE", erreur quadratique moyenne, comme critère de validation :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{mes,t} - Q_{sim,t})^2}{n}}$$

avec Q_{mes} : débit mesuré et Q_{sim} : débit simulé

II- Mise en œuvre et résultats du modèle GR2M

Dans le modèle GR2M les deux paramètres de calages ne sont pas directement comparables aux processus mis en évidence dans l'analyse hydrologique. Le calage de ces valeurs s'est donc fait manuellement, pas à pas, en faisant varier les deux paramètres jusqu'à obtenir la meilleure valeur au test de Nash.

Les résultats obtenus sont très mitigés ; Seuls les débits des bassins du Haut Sebou à la station d'Azzaba et du Zloul à la station de Dar El Hamra ont pu être simulés avec un critère de Nash acceptable, respectivement de 67,3 et 80,0 (fig.11.1 et 11.2).

Figure 11.1 : Hydrogramme observé et simulé à la station d'Azzaba

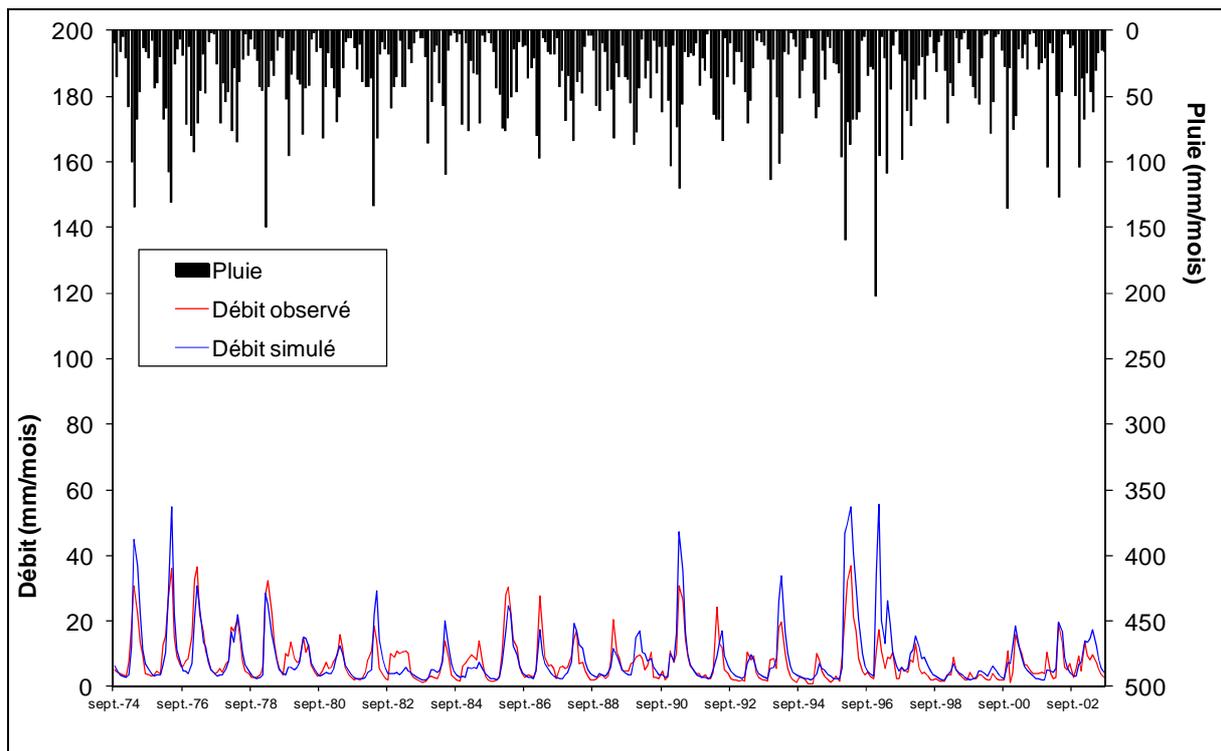
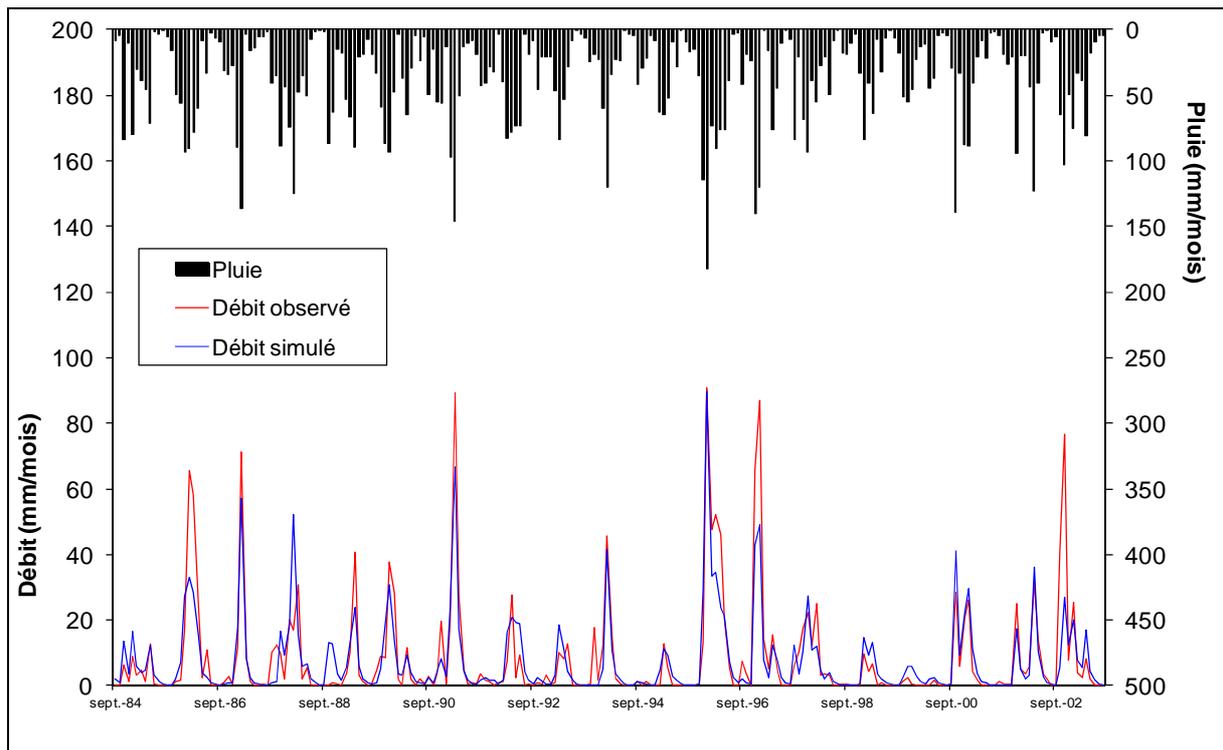
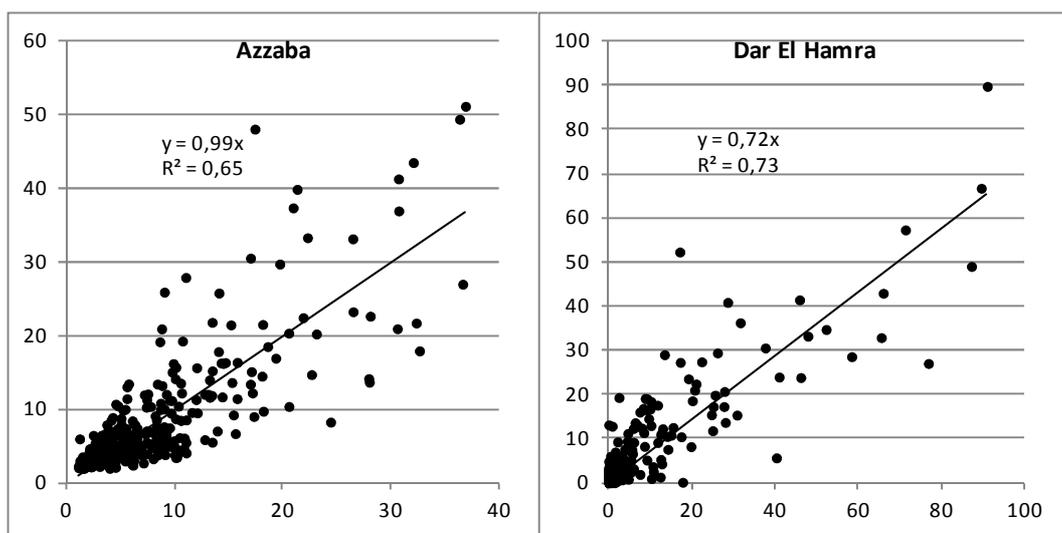


Figure 11.2 : Hydrogramme observé et simulé à la station de Dar El Hamra

Ce critère masque néanmoins un biais accusé (fig.11.3) pour la station de Dar El Hamra pour laquelle la modélisation a du mal à simuler les hauts débits.

Figure 11.3 : Régression linéaire entre les débits observés et simulés aux stations d'Azzaba et de Dar El Hamra

1- Les enseignements de la modélisation GR2M

Les modèles ont été calés sur la base d'une ETP calculée selon Turc. Les valeurs Modis se sont révélées bien trop élevées pour réussir à caler les modèles.

Le non calage du modèle sur les autres stations pose question. Pour la station d'Aït Khabach ce n'est finalement guère étonnant compte tenu de la densité de prise d'eau vers les séguias à l'amont. Les prélèvements sont tels que le régime du cours d'eau est très éloigné du naturel. Pour les débits à la station de Pont de Mdez on peut évoquer des problèmes d'hydrométrie compte tenu de sa situation sur le cours du Sebou à quelques kilomètres à l'amont de la station d'Azzaba pour lesquels le modèle fonctionne. Pour la station d'El Mers sur le Mâassèr il est difficile d'avancé des arguments en faveur d'une explication plutôt qu'une autre.

Un autre enseignement de cette modélisation est que le coefficient de Nash chute à partir de l'année 1996, soit juste après le changement dans la pratique hydrométrique des services gestionnaires. Donc ces nouvelles pratiques ont bien dégradé la qualité des données hydrométriques.

IV- Mise en œuvre et résultats du modèle ORCHY

Compte tenu du grand nombre de paramètre à caler dans le modèle ORCHY sa mise en œuvre est délicate. D'autre part nous n'avons réussi à valider que la version permanente soit à l'échelle moyenne mensuelle sur des périodes variables en fonction des données pour toutes les stations excepté celle d'Aït Khabach (fig.11.4, 11.5, 11.6, 11.7). La RMSE pour les 4 stations est voisine de 1 mm (tab.11.2).

Comme point de départ au calage nous avons utilisé les valeurs issues de l'analyse hydrologique : le coefficient de tarissement journalier α converti en coefficient de vidange mensuelle (cf. supra) et les valeurs de l'équation de ruissellement de Turc ont également été données pour reproduire les valeurs observées sur les hydrogrammes.

Figure 11.4 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station d'Azzaba

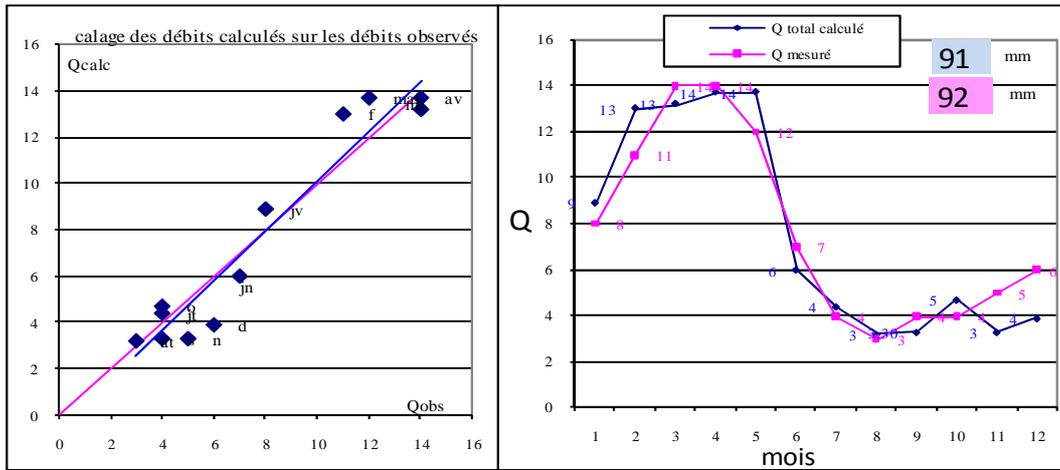


Figure 11.5 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station de Dar El Hamra

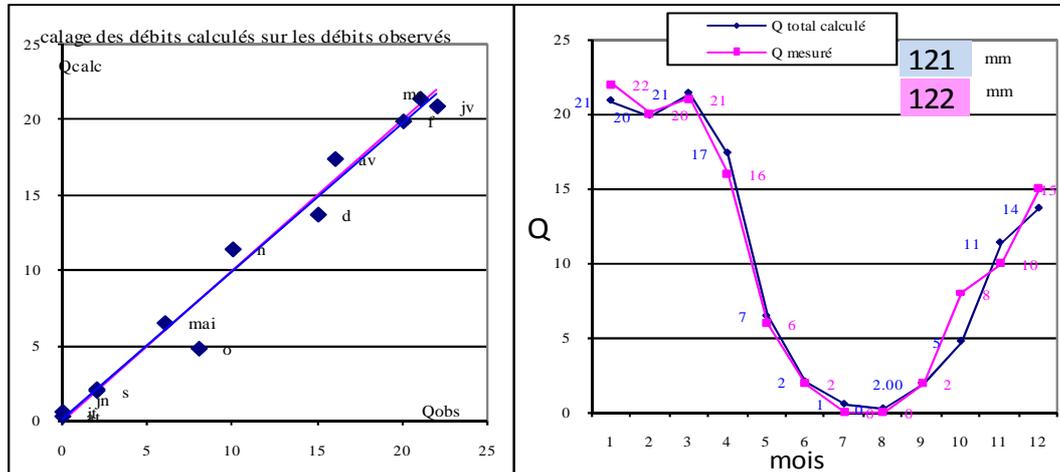


Figure 11.6 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station de Pont de Mdez

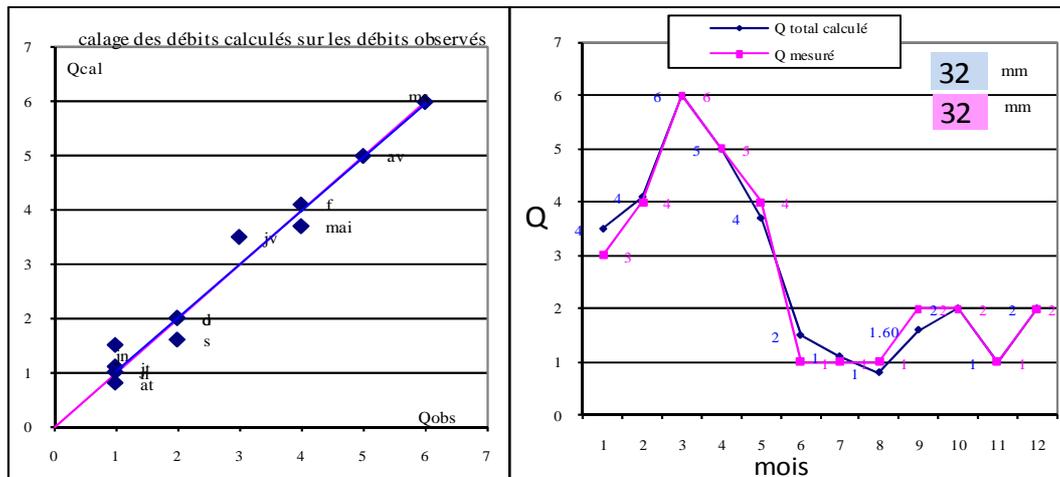
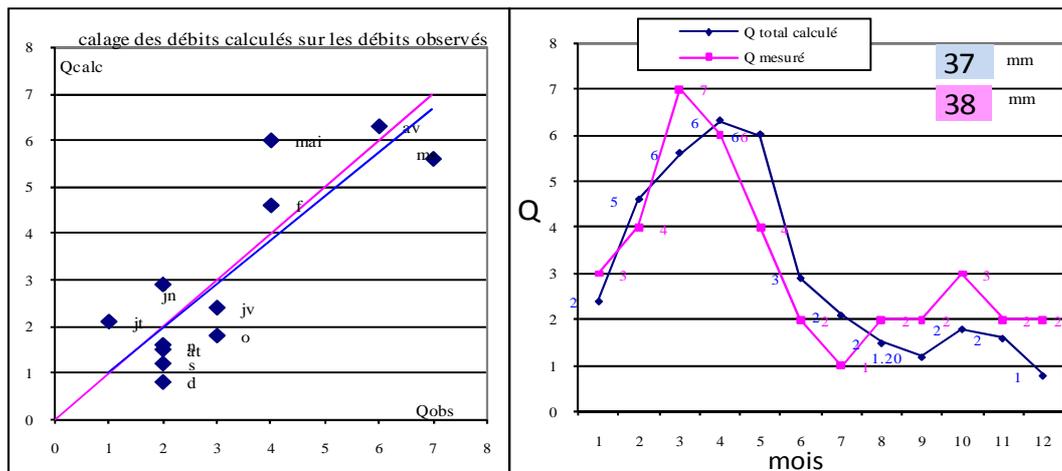


Figure 11.7 : Lames d'eau mensuelles mesurées et calculées à la station d'El Mers

V- Les résultats

Le premier constat, comme pour la modélisation GR2M, est que l'ETP Turc est plus propice au calage du modèle. Néanmoins ces valeurs ont dû faire l'objet d'une correction importante pour les faire tomber à 800 mm pour le bassin total à Azzaba par exemple. Cette faible ETP pose la question de la représentativité de ce concept théorique : Modis la "mesure" à près de 1600 mm, Turc le calcul à environ 1100 mm et le modèle se cale avec des valeurs comprises entre 790 et 1000 mm. Il est donc difficile de conférer à L'ETP une représentation physique et reste donc une valeur de calage dans le modèle ORCHY.

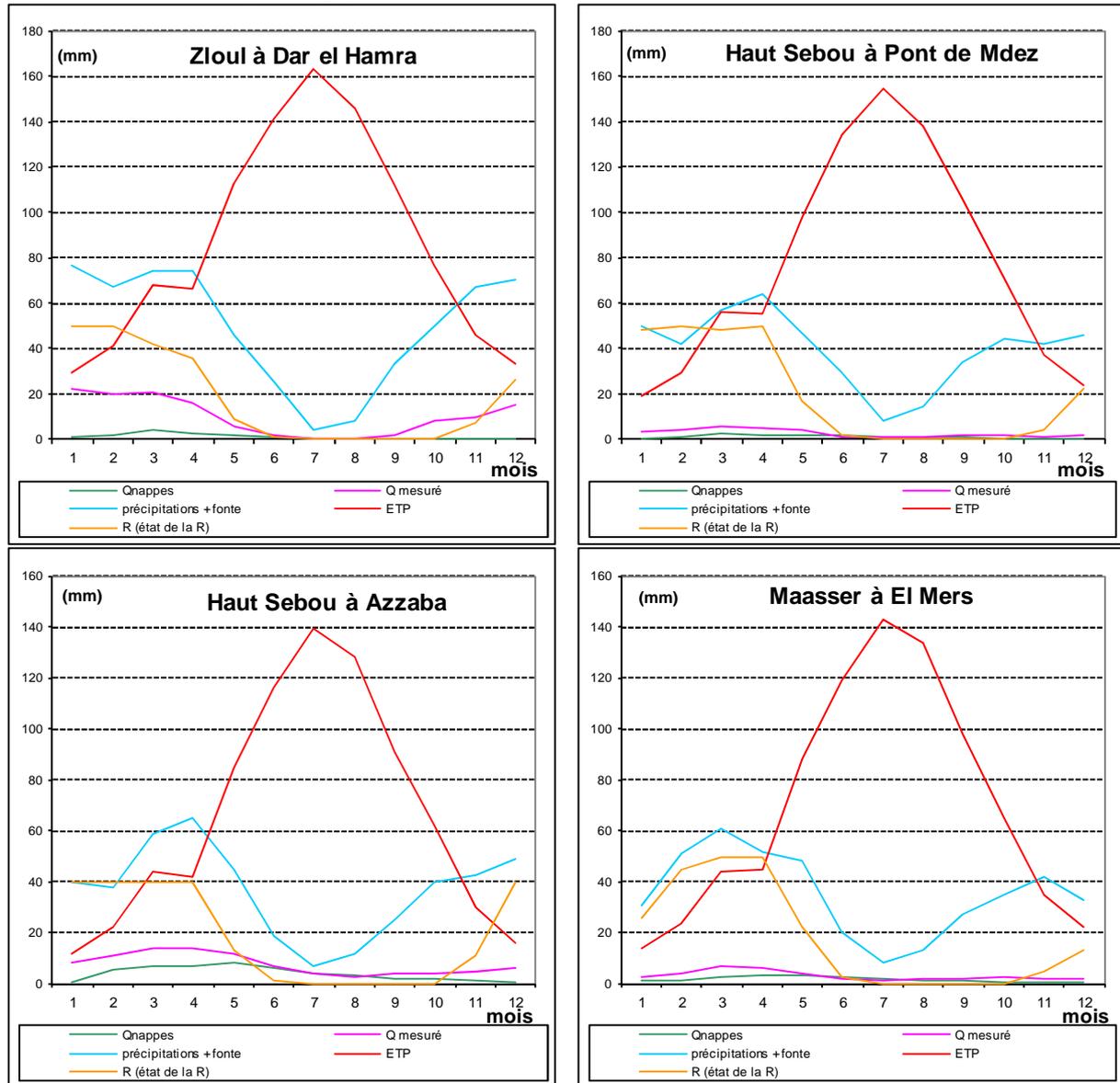
Tableau 11.2 : Principaux paramètres de calages et résultats du bilan hydrologique aux stations

	Principaux paramètres de calages				Principaux résultats				
	RU	Correction ETP	Coef. vidange	Stock neige	ETR	part nappe	Qmes	Qsim	RMSE
Azzaba	40 mm	252 mm	27%	18 mm	346 mm	53%	92 mm	91 mm	1,22 mm
Pont de Mdez	51 mm	120 mm	25%	28 mm	441 mm	37%	32 mm	32 mm	0,26 mm
Dhar El Hamra	50 mm	72 mm	40%	33 mm	471 mm	11%	122 mm	121 mm	1,22 mm
El Mers	50 mm	192 mm	25%	9 mm	382 mm	32%	38 mm	37 mm	1,03 mm

Sur la base de cet ETP modifié et une RU (réserve utile) voisine de 50 mm le bilan hydrique génère des valeurs d'ETR comprise entre 346 mm sur la totalité du bassin à Azzaba et 471 mm sur le Zloul. La valeur à Azzaba est comparable à celle de Modis par contre les autres leurs sont supérieures de 100 mm. Encore une fois il apparaît difficile d'interpréter ces écarts de valeurs entre les méthodes (Modis et bilan hydrique) et au sein même du bassin du Haut Sebou. Ces valeurs en sont néanmoins caractéristiques d'un état moyen de l'ETR.

Le coefficient de vidange de nappe utilisé pour Azzaba est proche de celui obtenu par l'analyse des phases de tarissement. Par contre il est beaucoup plus faible pour les autres stations. Malgré ces différences la part du débit de nappe dans le débit total est conforme à ce qui a été calculé à partir des phases d'écoulement de crue, compris entre 11% pour le Zloul et 53% pour le Haut Sebou à Azzaba (tab.11.2).

Figure 11.8 : Bilan hydrologique sur les bassins du Haut Sebou



Le régime des nappes apparaît néanmoins marqué par une plus ou moins grande inertie. A Pont de Mdez et Dar el Hamra son maximum est en mars/avril, calé sur le maximum des pluies utiles. Pour Azzaba et El Mers le plus fort débit de nappe se situe en mai, traduisant un aspect plus capacitif des aquifères de ces bassins. Notons que quelque soit le bassin à partir de juin les écoulements dans les rivières sont presque exclusivement dus aux nappes d'eau souterraine et cela jusqu'en octobre.

Enfin, pour ajuster au mieux le modèle nous avons eu recours à la représentation de l'influence de la neige sur les écoulements. Une rétention nivale de l'ordre de 20 mm a été simulée pour les mois d'hiver avec une restitution au mois de mars et avril.

Donc globalement la modélisation du bilan hydrologique à l'échelle mensuelle moyenne par le modèle ORCHY rend correctement compte du fonctionnement des bassins du Haut Sebou avec néanmoins l'impossibilité de relier les paramètres de calage aux valeurs déterminées par l'analyse hydrologique.

Conclusion du chapitre 11

La très grande difficulté à caler les modèles que ce soit ORCHY ou GR2M nous a fait revoir à la baisse nos ambitions sur leur utilisation pour une extrapolation à partir de séries de données élaborées pour des scénarios de changement climatiques définis. Cette application n'est pas réaliste compte tenu de critères de validité situés à la limite de l'acceptable. Néanmoins le modèle ORCHY valide un bilan hydrologique à l'échelle mensuelle moyenne pour tous les bassins sur la base des précipitations spatialisées et le modèle GR2M valide le fonctionnement mensuel sur la chronique 1974-1995.

Ces modélisations peu performantes sont liées à plusieurs éléments :

Le premier est bien évidemment la complexité de ces bassins de part leur nature karstique avec un redéploiement en souterrain des volumes d'eau infiltrés. D'autre part la complexité orographique du terrain engendre des limites dans la méthode de quantification spatiale des précipitations, notamment pour les précipitations de type orageuses fréquentes en été et à l'automne dans ce secteur. Nous pouvons également ajouter la qualité des données hydrométrique surtout dans les hautes valeurs.

Conclusion de la quatrième partie

Cette partie nous a permis de faire une synthèse (état de l'art) de la modélisation hydrologique et les étapes de la mise en œuvre d'un modèle hydrologique.

Le choix des modules ORCHY et GR2M, est justifié d'abord par les données climatiques dont nous disposons (entrées du modèle) et arce qu'il s'agit de modèles conceptuels, simples, aux paramètres peu nombreux mais associables à une réalité physique mesurable.

Il est justifié également par la recherche du degré de cohérence des phénomènes quantifiés dans la partie'' hydrologie analytique''.

La représentation du bilan hydrologique à l'échelle mensuelle a permis d'envisager l'impact des modifications du forçage climatique sur les écoulements. La modélisation rend correctement compte du fonctionnement des bassins du Haut Sebou.

Conclusion générale

Au terme de cette étude, on rappelle que l'apport principal concerne les points suivants :

- La mise en évidence des tendances climatiques marquantes de la zone d'étude, ainsi que les variations spatio-temporelles des précipitations, des températures et de l'évapotranspiration dans le domaine d'étude
- la valorisation des campagnes de jaugeages pour affiner la précision spatiale de la connaissance hydrologique, dont l'objectif est la détermination du fonctionnement des nappes et l'influences des prélèvements.
- Le comportement hydrologique lors d'épisodes pluvieux, ou lors des périodes non influencés par les pluies.
- L'évolution de la politique d'irrigation au Maroc et au Moyen Atlas et le diagnostic de l'utilisation des eaux superficielles et souterraines dans le Haut Sebou.
- La modélisation du bilan hydrologique dans le bassin

Il a été montré dans la première partie de cette recherche l'hétérogénéité qui caractérise les composants physiques (forme des bassins, topographie, lithologie...) du Haut Sebou. Cette hétérogénéité s'observe aussi au niveau des apports climatiques et leurs distributions dans le bassin. L'application de la méthode de CUSUM sur des séries pluviométriques existantes depuis presque un siècle montrent des contrastes accusées entre ces périodes. Les périodes les plus sèches occasionnent une diminution conséquente des ressources en eau impactant considérablement la sphère économique et sociale du Maroc. La conjugaison des variations climatiques, l'hétérogénéité physiographique des terrains, les circulations Karstiques et les prélèvements « sauvages » sur le linéaire du cours d'eau gouvernent la répartition générale des débits, dont la dominance des roches imperméables influence l'organisation des écoulements. En effet, la méthodologie de valorisation des campagnes de jaugeages, sur des bassins unitaires plus ou moins homogène éclaircit les contrastes de potentialités des aquifères et témoigne d'une très faible inertie de l'ensemble des systèmes aquifères. Cela explique que, bien que cette partie du Moyen-Atlas soit constitué d'environ 55% de terrain perméable et présente donc de bonnes potentialités de ressource en eau souterraine, elle ne soustrait pas pour autant les populations au risque de sécheresse hydrologique si les pluies viennent à manquer sur plusieurs années consécutives. Enfin, cette démarche de déglobalisation de

l'information sous la forme de données ponctuelles, recueillies sur des bassins unitaires, bien que nécessaire, ne suffit pas à la connaissance fine du fonctionnement de l'hydrosystème Sebou. C'est la raison pour laquelle ces premiers résultats enrichiront une démarche de modélisation hydrologique dans de futurs travaux.

L'analyse statistique des valeurs de bas débits par le biais d'une modélisation du tarissement a été réalisée sur la base de résultats obtenus à partir de différentes méthodes de construction de courbes maîtresses de tarissement utilisant l'ensemble des phases hydrologiques de tarissement disponibles sur les hydrogrammes. Sur cette base nous avons pu calculer les bas débits « naturels » et extraire les débits d'étiages. Une analyse statistique a permis de calculer des débits fréquentiels de référence utiles à la gestion de la ressource. Car il s'agit d'une période critique de ressource en eau", c'est à dire pendant la période d'été où se combinent une moindre pluviométrie et de très importants prélèvements pour l'irrigation. L'ajustement systématique des phases de tarissement par la loi de Maillet, dont les coefficients de Maillet a pu être employés pour expliquer la diversité spatiale des écoulements en étiage. Par ailleurs, la mise en relation des débits d'étiages avec les précipitations annuelles apporte une dimension prédictive à la méthode.

Cette recherche nous autorise également de mettre en évidence les dynamiques agraires qu'a connues le Haut Sebou. Ces dynamiques sont accompagnées par l'intensification des cultures ce qui favorise l'importance de l'irrigation dans le bassin. L'enquête menée sur le terrain a permis de diagnostiquer les modes de la gestion de l'eau d'irrigation, dont le mode archaïque basé sur des coutumes traditionnelles est le plus dominant. Il a permis aussi de montrer la pression exercée sur les nappes par le surpompage et la dominance des cultures consommatrices de l'eau (pomme de terre et oignon) notamment dans plaine de Guigou. Cette dernière présente un cas représentatif en matière de gestion des ressources en eau et des changements du comportement cultural dans le Haut Sebou.

Bibliographie

ABHS. (2006). Etude de la faisabilité de transfert du Haut Sebou vers la plaine du Sais, rapport de synthèse, 27 p.

Abi-Zeid I., Bobée B. (1999). La modélisation stochastique des étiages : une revue bibliographique, revue des sciences de l'eau, n°12/3, pp. 459-483.

Agoumi A., Debbarh A. (2006). Ressources en eau et bassins versants du Maroc: 50 ans développement (1955-2005), in www.rdh50.ma.

Akdim B. et Amyay M. (1999). Environmental vulnerability and agriculture in the karstic Domain : Landscape indicators and cases in the Atlas high- lands. Morocco. In International Journal of speleology. Theme issue with special editor : karst and agriculture in the World. V. 28B, Soc. Speleol. Italiana, pp. 119-138.

Akdim B., Sabaoui A., Amyay M., Laouane M., Gille E., Obda Kh., (2011). Influences hydro karstiques du système sourcier Aïn Sebou-Timedrine-Ouameder sur l'hydrologie de l'oued Sebou (Moyen Atlas, Maroc). Zeitschrift für Geomorphologie vol. 56-2, pp. 165-181.

Ambroise B. (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, Facteurs et Modèles. Ed. H.G.A., Bucarest. 200 p.

Anctil F., Rousselle J., Lauzon N. (2005). Hydrologie : cheminement de l'eau. Presses internationales polytechnique. 317 p.

Arts I., Sary M. (2000). Cartographie des débits d'étiage : application au bassin de la Meurthe. Revue Géographique de l'Est. Vol. 40 / 1-2, 14 p.

Aubriot O. (2000). Comment « lire » un système d'irrigation ? Une approche pour l'étude de systèmes irrigués traditionnels, illustrée de cas pris au Népal. Acte du colloque sur la gestion collective de l'eau en France et dans le monde, Université catholique de Louvain. 21 p.

Aït Hamza M., Akdim B. (1988). Ressources en eau et système d'irrigation au M'Goun. ANAGEM, RGM. Vol 12, nouvelle série, N° 2, pp. 33-40.

Badidi B. (1995). La révolution des vergers de rosacées dans le Moyen-Atlas, thèse de doctorat, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Limoges, 448 p.

Bamoye K. (2007). Gestion sociale de l'eau et projet de modernisation hydraulique dans une vallée du haut atlas au Maroc : les Aït Hakim (des Aït ouguemez). Hal, Cirad, Montpellier, 16 p.

Banque mondiale. (2010). Rapport sur le développement dans le monde : Développement et changement climatique, 52 p.

Bazzna A., De Meulemeester J. (2009). La noria, l'aubergine et le fellah : archéologie des espaces irrigués dans l'occident musulman médiéval, 9e-15e siècles. Academia press, 500 p.

Beaudet G. (1969). Les Beni M'Guilt du Nord, » In Rev. Géog. Du Maroc, n°7, pp.3-80.

Beaulieu C., Ouarda T., Seidou O., Boulet G., Yagouti A. (2007). Etude comparative d'homogénéisation des précipitations. Rapport de recherche N° R-907, 107 p.

Bekkari L. (2009). Dynamiques institutionnelles des systèmes d'irrigation communautaires au Moyen Atlas (Maroc). Thèse de la Faculté des sciences économiques, sociales et politiques, presses universitaires de Louvain, 312 p.

Belghazi B. (1983). Contribution à l'étude de l'écologie et de la productivité du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le versant nord du Haut-Atlas (Forêt de Tamga). Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Tech. Languedoc, Montpellier, 151p. + annexes.

Ben Tayeb A., Leclerc L. (1977). Le causse du Moyen-Atlase. Domaine atlasique et sud atlasique. Ressource en eau du Maroc. III, service géologique du Maroc, Rabat.

Benaabidate L. (2000). Caractérisation hydrologique du bassin versant de Sebou: hydrogéologie, qualité des eaux et géochimie des eaux thermales. Thèse Doc. Es-sc., Faculté des Sciences et Techniques, Fès, 250 p. 2000.

Benabid A. (2000) : Flore et écosystème du Maroc : évaluation et préservation de la biodiversité. Ibis Press, Paris, 357 p.

Benali A. (2006). Aménagement éatique, gestion sociale de l'eau et dynamiques institutionnelles dans la PMH au Maroc: réflexions à partir du cas du Ghiss. UCL, Université catholique de Louvain, 327 p.

Benjloul M. (2000). La rivière et les établissements humains dans la plaine du Guigou. Publication de La FLSH, Dhar El Mehraz. Fès, 10 p.

Boudhar A. (2009). Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des oueds du haut atlas de Marrakech. Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, 257 p.

Boujnikh M. (2008). Évolution des paysages irrigués dans le Souss oriental (Maroc) de la khattara à la motopompe, des terroirs faïd aux grands périmètres irrigués (le cas des Ouled-Berrhil, province de Taroudant). Thèse de doctorat. Université Nancy 2, 552 P.

Boulet G. (2010). Modélisation, spatialisation et assimilation des données de la télédétection pour la gestion de l'eau des milieux semi-arides. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches. Université de Toulouse, 84 p.

Bourbouze A (1999). Gestion de la mobilité et résistance des organisations pastorales des éleveurs du Haut Atlas marocain face aux transformations du contexte pastoral maghrébin. Thésaurus IAMM. Rome [Italie] : FAO, pp. 236-265.

Boussinesq J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources, Journal de mathématique pure et appliquées. Tom 10, 5ème Série, pp 5-78.

Brodie R-S., Hostetler S. (2005). A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University. 13 p.

Brunet-moret Y. (1971). Etude de l'Homogénéité des Séries Chronologiques des Précipitations annuelles par la Méthode des Doubles Masse. » In Cah. O.R.S.T.O.M. Vol.II n°3, Paris, pp. 147-165.

Castany G. (1982). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition. Dunod, 236p.

- Chakir N. (1994). Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit. Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris, 347 p.
- Chardon P-A. (1981). Méthodes pratiques de dépouillement de questionnaires. Thèse de doctorat. Imprimerie de l'Ouest SA. Peseux, Suisse, 136 p.
- Charrière A. (1990). Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intercontinentale : le Moyen Atlas au sud-est de Fès (Maroc). Thèse d'Etat, Université de Toulouse III, 589 p.
- Chartier M-M. (1960). Initiation à l'étude des crues. In: L'information géographique. Volume 24 n°2, pp. 56-60.
- Chillasse L. (2000). Les Oiseaux nicheurs et estivants des lacs naturels du Moyen Atlas. Actes des troisièmes journées : Oiseaux d'eau et les Zones humides au Maroc, Institut Scientifique, Rabat.
- Chillasse L., Dakki, M. (2004). Potentialités et statuts de conservation des zones humides du Moyen Atlas (Maroc) avec référence aux influences de la sécheresse. Revue Sécheresse et changements climatiques planétaires n° 4, Vol. 15, pp. 45-337.
- Chorley R-J. (1969). Introduction to Geographical Hydrology. Methuen young books, London, 224 p.
- Choubert G., Faure-Muret A. (1962). Evolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques. In : Livremémoire P. Fallot, Mém. h. sér. Soc. Géol. France, pp. 447-527.
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill: New York. 572 p.
- Claire L. (2011). Les étiages : Définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage, document 571, 15 p.

- Colo G. (1961). Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. Notes, Mem. Serv. Géol. Maroc, n° 119, Rabat, pp. 721-733.
- Corbel J. (1952). Travaux russes sur le Karst. Annales de Géographie. 1952, t. 61, n°327. pp. 377-378.
- Corbonnois J. (2000). Les facteurs de l'organisation spatiale des écoulements en étiage. Exemple du bassin versant du Mouzon (Lorraine). Revue géographique de l'Est. Vol. 40 /1-2, 14 p.
- Corbonnois J., François D., Arts I., Sary M., Gille E., Gamez P., Devos A., Decloux J-P (1998). Répartition des écoulements en basses eaux. Aspects méthodologiques. C N F G G - Rapport Quadriennal. 8 p.
- Corbonnois J., François D., Arts I., Sary M., Devos A., Decloux J-P., Gille E., Gamez P. (1999). Répartition des écoulements en basses eaux. Aspects méthodologiques et applications. À paraître dans Rapport quadriennal CNFSH.
- Cosandey C. (1999). Conséquence de la forêt sur le bilan d'écoulement annuel. Bulletin de la Société géographique de Liège, 37,1999/2, PP. 63-72.
- Cosandey C. (1995). La forêt réduit-elle l'écoulement annuel ? Ann. Géog., pp. 581-582,
- Cosandey C., Bibots., Dacharry M., Gille E., Laganier R., et Salvadorp G. (2003). Les eaux courantes, Ed. Belin, 239 p.
- Cosandey C., Robinson M. (2000). Hydrologie continentale, Armand Colin, Paris, 368 p.
- Coser L. (1965). Théorie des conflits sociaux, Neuwied/Berlin: Hermann Luchterhand Verlag, 197 p.
- Crouser P., Corbette S., Seegrist D-W. (1966). Methods of measuring and analyzing rainfall interception by grass. International Association of Scientific Hydrology, Bulletin, 11:2, pp. 110-120

Dacharry M. (1975). Sur les fléchissements des débits estivaux de deux rivières du Massif Central français, la Senouire et l'llanche, affluent et sous-affluent de l'allier. RGE, 1-2, pp. 89-99.

Dacharry M. (1997). Dictionnaire Français d'Hydrologie, [<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICTARIS.HTM>].

Dahou T., Elloumi M., Molle F., Gassab et Romagny. (2011). Pouvoirs, sociétés et nature au sud de la Méditerranée. Développement durable et territoires. Vol. 3, n° 1, 4 p.

Decharme B. (2005). Développement et validation d'une modélisation hydrologique globale incluant les effets sous maille et la représentation des zones inondées. . Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 255p.

Deffontaines B. (1990). Développement d'une méthodologie morphonéotectonique - Analyse des surfaces enveloppées du réseau hydrographique et des MNT. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 225 p.

Devos A. (1996). Hydrologie et aménagements hydrauliques de la Saulx et de l'Ornent (lorraine). Th. Doc., Univ. Metz., 443 p.

Devos A. Nejjari A. (1998). La sécheresse hydrologique récente dans le bassin supérieur du Sebou (Moyen-Atlas). Rapport AUPELF-UREF, 57 p.

Devos A., Nejjari A. (1998). La sécheresse hydrologique récente dans le bassin supérieur du Sebou (Moyen Atlas). Rapport de fin de travaux dans le cadre d'une bourse AUPELF- In Mosella, t.XXV, n° 3-4. pp. UREF, Lab. Géog. Phy., Univ. Metz et Lab., Anal. Géo-envir., Univ. Sidi Mohamed Ben Abdellah, Saïs-Fès, 57p.

Devos A., Benjloul M., Nejjari A. (2000). Les ressources en eau et leurs utilisations dans la plaine du Guigou (Moyen Atlas, Maroc).» In Mosella, t.XXV, n° 3-4, pp. 327-339.

Devos A., Nejjari A., Gille E., Akdim B., Benjloul M. (2000). Ressources et usages de l'eau dans le bassin supérieur de l'oued Guigou (Moyen- Atlas Maroc). Etudes de géographie physique de l'Université d'Aix- Marseille, n°xxviii, 1999, Actes du colloque. Du 8-10 oct. 1998 "la montagne méditerranéenne : Paléoenvironnements, morphogenèses, aménagements", pp. 191-195.

- Doukkali M-R. (2005). Water institutional reforms in Morocco. *Water Policy* 7, pp. 71–88.
- DPA de Fès. (1989). Aménagement du bassin versant à l'amont du barrage Allal El Fassi.
- Dubreuil P. (1974). *Initiation à l'analyse hydrologique*. Masson, Orstom, Paris, 216 p.
- Duda P-B., Hummel P-R., Donigian A.S., Imhoff J-C. (2012). Basins/HSPF : model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, vol. 55(4) : 1523-1547 American Society of Agricultural and Biological Engineers, pp. 1523- 1547.
- Dugot P. (2001). *L'eau autour de la Méditerranée*. Paris, L'Harmattan ,190 p.
- El Ghachi M. (2007). *La Seille : Un système fluvial anthropisé (Lorraine, France)*. Thèse de doctorat, Metz, 338 p + 56 p d'annexes.
- EL Jihad M-D. (2001). *L'eau de la montagne et le pouvoir étatique au Maroc : entre le passé et le présent*. *Annales de Géographie*, n°622, pp. 665-672.
- El Jihad M-D. (1982). *L'irrigation dans le Maroc antique*. *Homme Terre et Eaux*. Vol 48, pp. 89-9.
- El Khalki Y. (2000). *Contribution à l'étude hydrologique de quelques sources karstiques du Moyen Atlas : Ain Timedrine, Ouamander*. *Mosella Tome XXV*, N° 3-4, pp 153-164.
- El Khalki Y. (1991). *Hydrologie et hydrochimie des eaux karstiques (le synclinal de Skoura (Moyen Atlas, Maroc)*. *Travaux URA.*, 903, CNRS, n° XX, Aix-en-Provence, pp. 15-23.
- El Khalki Y. (1990). *Etude hydrogéomorphologique du haut Sebou : Cas du syndical de Skoura et de ses bordures (Moyen Atlas, Maroc)*. Thèse de Doctorat. Université d'Aix Marseille II, Tome I, 244 p + Annexes.
- Escourou G. (1978). *Climatologie pratique*. Edition Masson, collection géographie, 172 p.
- Ezzahiri M. (1989). *Application de l'analyse numérique à l'étude phytoécologie et sylvicole de la cédraie de Sidi M'Guild*. Thèse de doctorat .Sciences Agronomiques, IAV Hassan II, Rabat.

Faruqui N-I., Biswas A-K., Bino M-J (2001). Water management in islam. Unisted nations university press. USA, 151p.

Fedan B. (1978). Etude structurale de l'accident sud moyen atlasique entre Enjil des Ikhatarn et Imouzer Marmoucha (Moyen Atlas, Maroc). In Bull. Inst. Sc., 3, Rabat, pp. 169-184.

Fedan B. (1984). Les formations carbonatées liasiques du plateau de Dwira-Enjil (Moyen Atlas) : évolutions, dimentologique et paléogéographique. In Bull. Inst. Sc. 8, Rabat, pp. 51-65.

Fedan B. (1987). Géologie des chaînes atlasiques.” In la Grande Encyclopédie du Maroc, t.3, Géog. Phys. Géol., pp. 172-189.

Fedan B., La ville E. et El Mezgueldi A. (1989). Le bassin jurassique du Moyen Atlas (Maroc) : exemple de bassin sur relais de décrochements. In Bull. Soc. Géol., Fr., 8, V. 6, pp. 1123-1136.

Foody G-M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 80, pp. 185-201.

François D., Gille E., el Zumstein F. (1993). Analyse des séries chronologiques et applications aux données hydroclimatiques. » In l’Eau, la Terre et les Hommes, hommage a R. Frécault, Presse Université de Nancy, pp. 137-146.

François D., Sary M. (1994). Intérêt des profils hydrologiques d’étéage pour la détermination des débits de référence au droit des ouvrages hydrauliques (exemple de la Haute Meurthe dans les Vosges). *Revue de la Géographie Alpine*. Volume 82, numéro82-2, pp. 37-44.

François D., Sary M. Zumstein J.F., Auer J.C. (1994). Etude méthodologique de débits d’étéage, Rapport CEGUM.

Ftaïta T. (2012). De la gestion communautaire à la gestion associative de l’eau. Collection Update sciences et technologies. Edition Quae, pp. 351_362.

Gamez A., Fizaine J.P., Mansuy D., Scapoli J. (2000). Origine des circulations souterraines dans la vallée de l’oued Guigou (Moyen Atlas septentrional, Maroc. In *Mosella 2000*, t. xxv, n°3-4, pp. 195-216.

Gamez P., Zumstein J-F. (1993). Méthode de détermination des débits de base et de ruissèlement d'un cours d'eau. In l'eau, la terre et les hommes. Hommage a René Frecaut. Presse universitaire de Nancy, pp 113-120.

George P et Verger F. (2000). Dictionnaire de la géographie, Editions PUF.

Gille E. (2010). Spatialisation et modélisation des caractères de l'écoulement: une approche géographique de l'hydrologie. Dossier pour l'habilitation à diriger des recherches. Université Paris 7, 90 p.

Gille E., Nejari A., Francois D. (2000). Le lac Aguelmam Sidi Ali (Moyen Atlas Marocain) : un évaporamètre naturel. In Mosella 2000, t. xxv, Université de Metz, n°3-4, pp. 37-54.

Glossaire International d'Hydrologie. (1992). <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm>

Gonot. B. (1999). L'incidence des prélèvements ripicoles sur le débit des cours d'eau du bassin de la Midouze. In: Annales de Géographie. 1999, t. 108, n°606. pp. 191-197.

Grovel R. (1996). La préservation des forêts du Rif centro-occidental : un enjeu de développement de la montagne rifaine. In: Revue de géographie alpine. Tome 84 N°4. pp. 75-94.

Hall F-R. (1968). Base flow recessions-a review. Water Resour. Res., 4(5), pp. 973-983.

Hiez G. (1997). L'homogénéité des données pluviométriques In : Cah. Orstom, sér. Hydrol. 14(2) Paris, pp. 129- 172.

Hilali A. (2004). Diagnostic du développement de l'irrigation localisée dans le périmètre du Gharb (cas de Bhara-S.Med. Lahmer et Beht). Mémoire de 3ème siècle : IAV Hassan II, Rabat, 196 p.

Hortness J-E. (2006). Estimating low-flow frequency statistics for unregulated streams in Idaho, US Geological Survey Scientific investigations Report 2006-5035, 31p.

Houdret A. (2008). Les conflits autour de l'eau au Maroc: origines sociopolitiques et écologiques et perspectives pour une transformation. Thèse de doctorat en science politique, Université Paris 8 France et Université Duisburg- Essen Allemagne, 97 p.

Hrou A. (2013). Gestion des ressources naturelles du Haut Atlas Oriental Marocain : cas des terrains de pâturage et de l'eau d'irrigation dans la région d'Imilchil-Amellago. L'Association ADRAR, 5 p.

Huxhold W-E., Levinsohn A. G. (1995). Managing Geographic Information Systems Projects, Oxford University Press, New York.

Jennan L. (2004). Le Moyen Atlas central et ses bordures, mutations récentes et dynamiques rurales. Ed Al Jawahir. Fés, 706 p.

Jennan L. (1986). Mutations récentes des campagnes du Moyen Atlas et de ses bordures. In: Méditerranée, Troisième série, Tome 59, 4-1986. Villes et campagnes au Maroc, pp. 49-62.

Jolly G. (2001). La gestion des périmètres irrigués Méthodologie de diagnostic Cas d'un transfert de gestion : les associations d'usagers du périmètre du N'Fis (office du Haouz, Maroc). Actes de l'atelier, 22-23 janvier 2001, Montpellier, France, pp ; 25-45.

Jouve A-M. (2002). Cinquante ans d'agriculture marocaine, in "du Maghreb au Proche Orient : les défis de l'agriculture". L'Harmattan, Paris, pp. 51-71.

Kadiri Z. (2013). Eau : une coordination à plusieurs cycles. Published on *Economia*, 3 p

Kerbout M. (1991) : Les conditions humaines de formation et d'évaluation des systèmes d'irrigation dans le Moyen Atlas septentrional. *Espace Rural*, pp. 102-117.

Labhar M. (1993). Dynamique actuelle du milieu forestier dans le Moven Atlas occidental, cas du Jbel Michlifene-Hebri, symposium sur l'environnement en Afrique. Comité Nat. de Géog. du Maroc et Assoc. des Géog. Africains, Rabat- Fès- Agadir.

-Labhar M. (1993). Dynamique actuelle du milieu forestier dans le Moven Atlas occidental, cas du Jbel Michlifene-Hebri, symposium sur l'environnement en Afrique. Comité Nat. de Géog. du Maroc et Assoc. des Géog. Africains, Rabat- Fès- Agadir.

Labhar M. (1998). Les milieux forestiers et pré-forestiers du Moyen Atlas central nord occidental: App.roche géographique, phytoécologique et dynamique. Thèse de Doctorat, Univ. libre de Bruxelles, 404p.

Laith S. (2008). La petite et moyenne hydraulique (pmh) : les enseignements tires et réflexions pour de nouvelles orientations. Revue HTE N°141, décembre 2008, 3 p.

Lang C. (2007). Etiages et tarissements : vers quelle modélisations ? : L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thèse de Doctorat, Université de Metz, CEGUM, 292 p.

Lang C., Freyermuth A., Gille E., François D. (2006). Le dispositif PRESAGES (PREvisions et Simulations pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères) : des outils pour évaluer et prévoir les étiages. Géocarrefour, Vol 81/1, pp. 15,24.

Lang C., Gille E. (2006). Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage », Norois [En ligne], 201, 15 p.

Laouina A. (2007). La gestion conservatoire des eaux et des sols au Maroc : Essai de distribution spatiale. Publications du groupe Relor de la chaire Unisco-GN, FLSH, Univ Mohamed V, Rabat.

Laurent F. (2010). Modélisation hydrologique -Approche semi-distribuée à base physique. Université du Maine –UMR CNRS Espaces et Sociétés (France), 27 p.

Le Lay M. (2006). Modelisation hydrologique dans un contexte de variabilite hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso- échelle au Bénin. Hydrology. Institut National Polytechnique de Grenoble, 266 p.

Lejeune O., Devos A., Marre A. (1989). Spatialisation des débits d'étiage de la Blaise (Marne-France)

Lepoutre B., Martin J., Chamayou J. (1967). Le Causse Moyen Atlasique. Les cahiers de la recherche agronomique, N° 24, 1967, congrès de pédologie méditerranéenne, Madrid. Chap IV, pp 207-226.

Losson B. (2003). karstification et capture de la Moselle (Lorraine, France vers une identification des interactions. Thèse de Doctorat de l'Univirsité de Metz. 472 p.

Longley P., Gouodchild M., Maguire D., Rhind D. (2005). *Geographic Information Systems and Science*. Esri press, England. 519 p.

Loup J. (1957). Note sur l'évaporation au Maroc. *Revue de géographie alpine*, tome 45 N°2, pp. 351-379.

Loup J. (1974). *Les eaux terrestres. Hydrologie continentale*. Ed. Masson, Paris. 176 p.

Madani T. (2005). La question du partage de l'eau entre amont et aval dans le monde rural marocain médiéval. *RURALIA V. – Památky archeologické – Supplementum 17*, 68-72, pp.

Madani T. (2006). Le partage de l'eau dans l'oasis de Figuig (Maroc oriental) Approche historique et archéologique. *Mélanges de la Casa de Velázquez 36-2*, pp. 61-82.

Makhlouf Z. (1994). Compléments sur le modèle Pluie-Débit GR4J, essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat. Université Paris XI Orsay. 426 p

Mandal U., Cunnane C. (2009). Low-flow prediction for ungauged river catchment in Ireland. *Irish National Hydrology Seminar*, 16 p.

Marchandise A. (2007). Modélisation hydrologique distribuée sur le Gardon d'Anduze ; étude comparative de différents modèles pluie-débit, extrapolation de la normale à l'extrême et tests d'hypothèses sur les processus hydrologiques. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 214p.

Margat J. (2008). *L'eau des Méditerranéennes situations et perspectives*. Éd. L'Harmattan. Paris, 288 p.

Martin C., Didon-Lescot J-F., Cosandey C. (2003). Le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants granitiques du Mont-Lozère : Influence du couvert végétal sur les crues et les étiages. *Études de Géographie Physique*, n° XXX, 2003, 24 p.

Martin J. (1981). *Le Moyen Atlas central : Etude géomorphologique*. Notes et mémoires du service géologique N° 258Bis, 107 pages.

Martin J. (1986). L'évolution du bassin de Skoura (Moyen Atlas) au cours du Néocène. *Revue de la géographie du Maroc*, N° 14, pp. 117-132.

Mathieu P., Benali A., Aubriot O. (2001). Dynamiques institutionnelles et conflit autour des droits d'eau dans un système d'irrigation traditionnel au Maroc. In: Tiers-Monde. 2001, tome 42 n°166. pp. 353-374.

Maud P., Winter T-C. (1997). Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA. *Ground Water*, vol. 35, N° 2.

McCabe M., Wood E., Su H., Vinukollu R., Ferguson C., Zu S. (2011). Multisensor global retrievals of evapotranspiration for climate studies using the surface energy budget system. NASA's earth observing system and the science of ASTER and MODIS, *Land remote sensing and global environment change*, Vol. 11, pp. 747-778.

Meylan P., Favre C., Musy A. (2008). *Hydrologie fréquentielle: Une science prédictive*. Presses polytechniques et universitaires romandes. 174 p.

Meylon P., Avre A-C., Musy A. (2008). *Hydrologie fréquentielle une science prédictive*. Presses polytechniques et universitaires romandes. 173 P.

Miller C-L., Laflamme R-A. (1958). The digital terrain model- Theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24(3), pp 433-442.

Ministère délégué auprès du Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement- chargé de l'Eau. <http://www.water.gov.ma/index.cfm?gen=true&id=12>

Moore R-D. (1997). Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment. *Journal of Hydrology*, vol. 198. pp 260-270.

Mouelhi S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. Thèse de doctorat, Université Paris VI, ENGREF, Ecole des Mines de Paris En association avec l'IFP, 323 p.

Mouelhi S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. Thèse de doctorat de l'ENGREF, 323 p.

- Mouna M. (1982). Recherches écologiques sur le peuplement frondicole du cèdre dans le Moyen Atlas marocain. Thèse de 3^{ème} cycle, Université Aix Marseille, 121 p.
- Mu Q., Heinsch F. A., Zhao M., Running S. W. (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment* n°111, pp. 519–536.
- Mu Q., Zhao M., Running S.W. (2011). Improvements to a MODIS Global Terrestrial
- Musy A., Higy C. (2004). Hydrologie 1 une science de la nature, presses polytechniques et universitaires romandes. 314p.
- Musy A., Higy C. (2004). L'hydrologie 1 : Une science de la nature. Collection gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires Roamandes, 516 p.
- Nathan R-J., McMahon T-A., 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, vol. 26, N°7.
- Nejjari A. (2002). La sécheresse, l'eau et l'homme dans le bassin versant du Haut Sebou (Moyen Atlas Septentrional-Maroc). Thèse de Doctorat de l'Université de Metz, 304 p.
- Nejjari A. et devos A. (2000). Spatialisation et cartographie des rendements dans le bassin du haut sebou, (Moyen Atlas, Maroc). In *Mosella 2000*, t. xxv, n°3-4, pp. 121-138.
- Nejjari A., Gille E., et françois D. (2001). L'apport des longues séries pluviométriques dans l'étude de la sécheresse dans le Moyen Atlas (Maroc). » In *Mosella 2000*, t. xxv, Univ de Metz, n°3-4, pp. 55-69.
- Nejjari A., Gille E., Francois D. (2000). Les longues séries pluviométriques et la caractérisation de la sécheresse récente du nord du moyen atlas (Maroc). » In *Mosella*, t. XXV – 3-4, pp. 37-54.
- Nicod J. (1993). Impacts des déboisements et défrichements récents sur les plateaux et moyennes montagnes calcaires du domaine méditerranéen. Actes du 116^{ème} Congrès national des sociétés savantes, Sc. Nat. Et Montagnes, Paris, pp. 53-66.

Nicod J. (1997). Karsts et fonctionnement hydrologique dans le Haut Atlas central calcaire et sur la bordure du Moyen Atlas méridional. *Annales de Géographie*. Volume 106, numéro, pp. 536-538.

Nori M. (2007). *La mobilité pastorale : une histoire à réécrire*. CIRAD, Montpellier, 5 p

Ntarmouchant A., Smaili H., Sabri K. (2012). Volcanisme plio-quadernaire du Moyen Atlas, région Timahdite. 10 journées universitaires de l'AESVT, 13 p.

Obda Kh. (2004). Indigences extrêmes des écoulements des oueds méditerranéens : cas des oueds Nekor au Rif et du Haut Sebou au Moyen Atlas. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Maroc 422p +15anexes.

Obda Kh., Gille E., Akdim. (2000). Application de la méthodologie des profils hydrologiques dans la gestion des ressources en eau : cas des oueds zlou (Moyen Atlas Septentrional) et Nekor (Rif Central). In *Mosella* 2000, t. xxv, n°3-4, pp. 109-120.

Ouarda T-B., Rasmussen P-F., Bobée B. et J. Bernier. (1998). Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle. *Revue des Sciences de l'Eau* 11 (n° spécial) : 41-49.

Ouhssain M., (2008). La gestion sociale de l'eau au Maroc, d'Azerf à la Loi sur l'eau, *Revue HTE* N°141. Décembre 2008, 8 p.

Pardé M. (1934). *Fleuves et rivières*. (Collection Armand Colin, n° 155) Paris. Petit in-8°, 224 p.

Pardé M. (1949). *Potamologie: Hydrologie fluviale*. Université de Grenoble, édition 2, 158p.

Perennes J-J. (1992). Un aspect de la question hydraulique au Maghreb : la politique des barrages. *Revue Égypte/Monde arabe* 10/1992, 10 p.

Pérennes J-J. (1993). *L'eau et les hommes au Maghreb*. Collection homme et sociétés. Edition Karthala et ORSTOM, 650 p.

Perrin C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble. 287 p.

- Popp H. (1986). L'agriculture irriguée dans la vallée du Souss. Formes et conflits d'utilisation de l'eau. Méditerranée, Troisième série, Tome 59, 4-1986. Villes et campagnes au Maroc, pp. 33-47.
- Potin C. (2002). Etude de la stratégie d'aménagement et de développement du moyen atlas, rapport thématique de diagnostic territoriale : Système d'élevage. Rabat et Lausanne, 38 p.
- Pujos A. (1963). Les milieux de la cédraie Marocaine. Etude d'une classification des cédraies de Moyen Atlas et du Rif en fonction des facteurs du sol et du climat et de régénération naturelle actuelle dans ces peuplements. Ann. Rech. Forest. Maroc, 8, 283 p.
- Pushpalatha R. (2013). Low-flow simulation and forecasting on French river basins: a hydrological modelling approach Simulation et prévision des étiages sur des bassins versants français : approche fondée sur la modélisation hydrologique. Thèse de doctorat. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (Agro Paris Tech). 246 p.
- Pyrce R-S. (2004). Hydrological low flow indices and their uses, WSC Report N°04-2004, Watershed Science Centre, Peterborough, Ontario, 33p.
- Ramoelo A., Majazi N., Mathieu R., Jovanovic N., Nickless A., Dzikiti S. (2014). Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. Remote Sens. 2014, 6, pp. 7406-7423.
- Rhoujjati A. (2007). Changement paléo environnementaux et paléo-climatiques depuis 21000 ans ^{14}C dans le Moyen Atlas Marocain : les lacs ifrah et Ifer. Thèse d'état. Université Chouaaib Doukali, El Jadida, 186 p.
- Riaux J. (2006). Aspects anthropologiques de la gestion participative de l'irrigation dans le Haut Atlas marocain. Actes du séminaire, novembre 2004, Montpellier, France. Cirad, Montpellier France, 11 p.
- Riou C. (1975). La détermination de l'évaporation : application à l'Afrique. Mémoire ORSTOM, 236 p.
- Roche M. (1963). Hydrologie de surface, Gauthier-Villars éditeur. Paris, 431p.

Roche M. (1969). Les processus du raisonnement chez l'hydrologue, Bulletin de la Section Géographique, Tome LXXX, 11 p.

Roche M. (1986). Dictionnaire français d'hydrologie de surface :<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/indexdic.htm>.

Sabaoui A. (1998). Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen-Atlas septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel- Ribat Al Khayr- Bou Iblane. Th. De Doct. d'Etat, Univ. Mohamed V., Rabat, 432p.

Sabaoui A. (1998). Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen-Atlas septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel- Ribat Al Khayr- Bou Iblane. Th. De Doct. d'Etat, Univ. Mohamed V., Rabat, 432p.

Sabaoui A. et Villard P. (1987). Fractures majeures et décollement de couverture dans le Moyen Atlas septentrional (sud ouest de Taza, Maroc). In C.R. Acad. Sc., 305, série 2, Paris, pp. 993-998.

Sabatier J-L., RUF T. (1995). La gestion sociale de l'eau. ORSTOP, Infore's eau, 3 p.

Samaaa D. (2010) : L'homme et l'anthropisation dans la plaine de Guigou. Mémoire de master. 116 p.

Sary M., Akdim B. (2000). La sécheresse hydrologique récente dans le bassin du Haut Sebou. (Moyen Atlas, Maroc). In Mosella 2000, t. xxv, n°3-4, pp. 121-138.

Sayad A., Chakiri S., Martin C., Bejjaji Z., Charfaoui H. (2011). Effet des conditions climatiques sur le niveau du lac Sidi Ali (Moyen Atlas, Maroc). Physio-géo, volum 5, pp. 251-268.

Scaetta H., Schoep A., Meurice R. (1937). La genèse climatique des sols montagnards de L'Afrique centrale. Les formations végétales qui en caractérisent les stades de dégradation. Institut Royal Colonial Belge, Section des Sciences Naturelles et Médicales, Bruxelles, 349 p.

- Seghair A. (2009). Dynamique écologique et dégradation des écosystèmes dans le Moyen Atlas Centro-Méridional Cas de la zone RAMSER d'Aguelmame Afnourir. Mémoire de master. Université sidi Mohamed Ben Abdelah, Fès. 117 p.
- Serra L. (1952). L'organisation des réseaux pluviométrique. La Houille Blanche, N° spécial B (1952), pp. 491-505.
- Soufiani N., Fedan B. (2002). Les dépôts bathoniens du synclinal d'El Mers (Moyen Atlas, Maroc) : unités formationnelles, analyse et cadre géodynamique. Bulletin de l'Institut scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 2002, n° 24, pp 1-14.
- Stromberg J-C., Beauchamp. V-B. Dixon M-D. Lite S. J. Paradzick C. (2007). Importance of low-flow and high-flow characteristics to restoration of riparian vegetation along rivers in and south-western United States. *Freshwater Biology*, 52(4), pp. 651-679.
- Sugiyama H. (1996). Analysis and extraction of low flow recession characteristics. *Water Resources Bulletin*, vol 32, N°3, pp. 491-497.
- Tag B. (1996). Les potentialités de développement du Moyen Atlas oriental et leur appréciation par les acteurs locaux. *Revue de géographie Alpin*. N° 4, pp. 51-60.
- Tag B. (1996). Les potentialités de développement du Moyen-Atlas oriental et leur appréciation par les acteurs locaux. *Revue de géographie alpine*. Tome 84 N°4. Pp. 51-60.
- Tag B., Loew G. (2000). Eau, aménagement et société dans la cuvette de Skoura (Bassin du Haut Sebou, Maroc). In *Mosella*, t. XXV – 3-4, pp. 37-54.
- Taibi A. (2012). Développement des territoires et besoins en qualification des jeunes ruraux au Maroc. Réseau international Formation Agricole et Rurale ; Montpellier, 84 p.
- Tallaksen L-M. (1995). A review of base flow recession analysis. *Journal of Hydrology*, vol.165, 22 p.
- Taous A. (2005). Géométrodynamique fluviale; processus morpho sédimentaires, ajustements spatio-temporels, paléo environnements et mutations des espaces fluviaux. Pub; FLSH Sais Fès, série: thèses et monographies, n° 11, 425p.

Tayebi A. (2006). Vulnérabilité des ressources en eaux karstiques en milieu méditerranéen semi-aride : le massif des Béni Snassen (Maroc oriental). Approche pluridisciplinaire et utilisation des méthodes «SIG». Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 386 p.

Tazi Sadeq H. (2006). Du droit de l'eau au droit à l'eau au Maroc et ailleurs. Edition la croisée du chemin, 481p.

Tenehaus M. (1998). La régression PLS: Théorie et pratique. Editions Technip, 254 p.

Termier H. (1936). Etudes géologiques sur le Maroc central et le moyen-Atlas septentrional. Notes Mém. Serv. Min. Géol. Maroc, Rabat, n° 33, t. 2, pp. 743-1082, fig.48-63.

Termier H. (1936). Etudes géologiques sur le Maroc central et le Moyen Atlas septentrional. Notes et Mém. du Serv. Mines et Cartes Géol., n°33, 1566 p.

Thietart R-A. (2014). Méthode de recherche en management- 4ème édition. Edition Dunod, Paris, 644 p.

Toebe C. Strang D-D. (1964). On recession curves. Recession equations. J. Hydrol. NZ, 3(2): 2-15.

Tsessema S-M. (2011). Hydrological modeling as a tool for sustainable water resources management: a case study of the awash river basin. TRITA LWR.LIC 2056, 38 p.

Vaudour J. (1984). Les travertins de piémont : Contribution à l'étude des géosystèmes karstiques méditerranéens. Coll. Montagnes et piémonts. Toulouse. Hommage A F. Tailleur, pp. 349-362.

Veltri M., Veltri P., Maiolo M. (1996). On the fractal dimension of naturel channel network. Journal of Hydrology, vol. 187, 137-144.

Vennetier M., Vila B., Liang Er., Guibal F., Ripert C. Chandieux O. (2005). Impacte des chngements climatiques sur la productivité foréstiére et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditarrané française. Ingénieries N° 44, pp. 49-61.

Willmott C-J., Robeson, S-M., Feddema, J. J. (1994). Estimating continental and terrestrial precipitation averages from rain-gauge networks. Inl. J. Climatol. 14, 403-414.

World meteorological organization. (2012). Glossaire International d'Hydrologie. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 469 p.

Yacoubi Soussane M. (1999). Aménagement hydraulique au Maroc : situation actuelle et programme national de l'irrigation. Bulletin Mensuel de Liaison et d'Information du PNTTA. Transfert de technologie en agriculture n° 58, 16p.

Yacoubi Soussane M. (2003). La régulation institutionnelle de la gestion de l'eau d'irrigation. Revue H.T.E, 15 p.

Zumstein J-F. (1978). Contribution à l'élaboration de cartes hydrologiques. Cartes des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1973, La Houille Blanche, n°6/7, 13 p.

ANNEXES

Chapitre 2

Annexe 2.1 : Formules

Indice de compacité de Gravelius): (K_c) permet de comparer la forme du bassin à un cercle. Il est égal à 1 pour un bassin circulaire et croît d'autant plus que la compacité diminue.

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

P : périmètre stylisé du bassin (Km)

A : superficie du bassin (Km²)

- Indice du rectangle équivalent : Il s'agit d'une transformation géométrique qui permet d'assimiler le bassin à un rectangle de même périmètre et de même superficie. L'indice du

$$I_r = \frac{l_r}{i_r}$$

rectangle équivalent s'exprime comme suit:

Avec :

L: la longueur du rectangle équivalent (km)

$$l_r = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right)$$

l : la largeur du rectangle équivalent (km).

K_c : indice de compacité de Gravelius

Chapitre 3

Annexe 3.1 : Chronogramme des stations pluviométriques utilisées

Station	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
AGUELMAM	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AIN TIMEDRIN	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
AIN LOUH ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
AIN BETIT ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
AÏTKHABACH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
AZROU ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
AZZABA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BAB BOUDIR ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BAB MARZOKA ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BAB OUENDER ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
BOULEMANE	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
DAR ARSA ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
DAR EL HAMRA	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
EL MERS	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
FES $\phi \phi$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
GALEZ ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
IFRAN ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
MISSOUR ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
SIDI MOUKHFI ϕ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
PONT MDEZ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
SEFROU $\phi \phi$	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	

Données observées x

Données comblées x

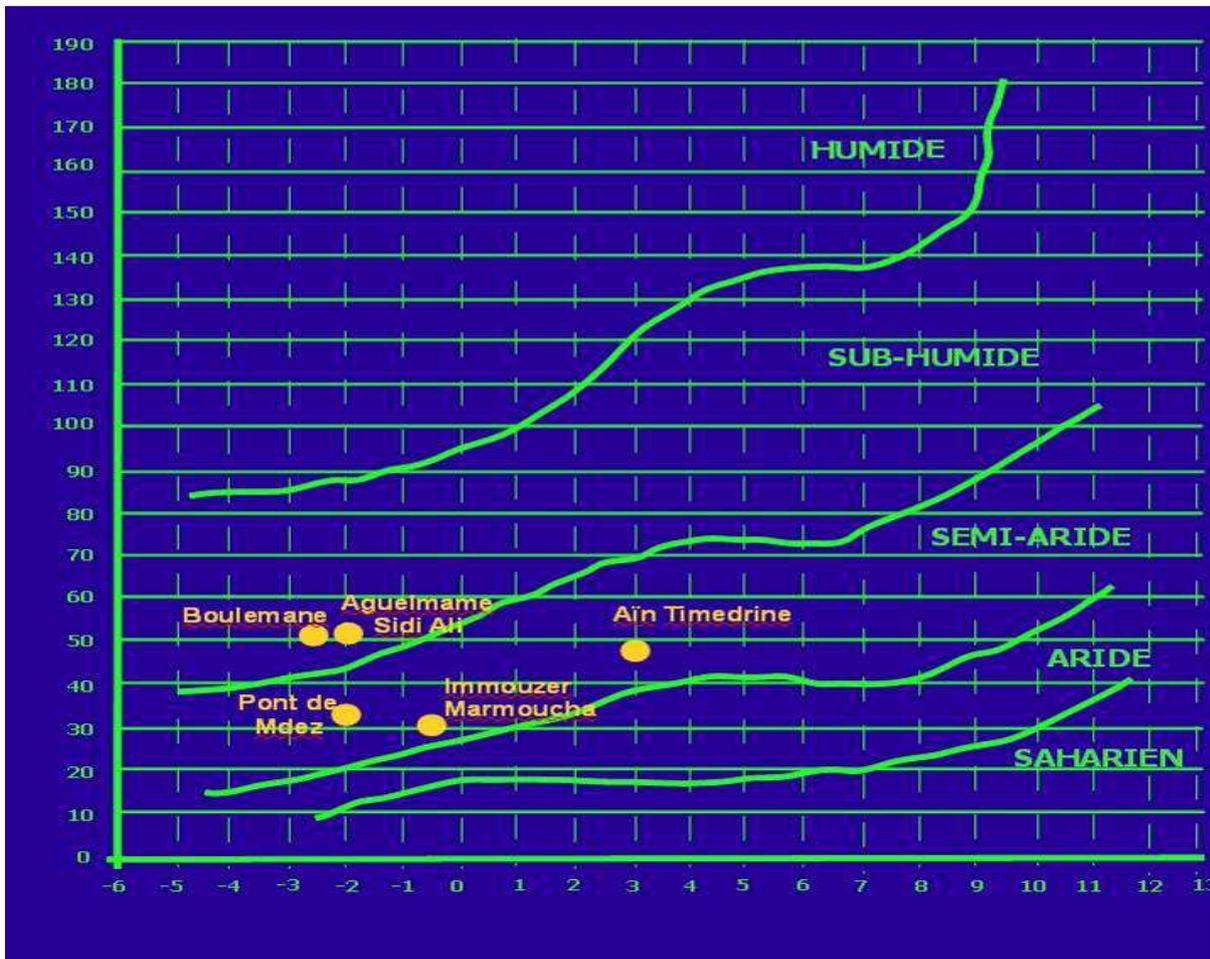
ϕ Station situe hors le BV du Haut Sebou

$\phi \phi$: Station a une série depuis 1914-1915

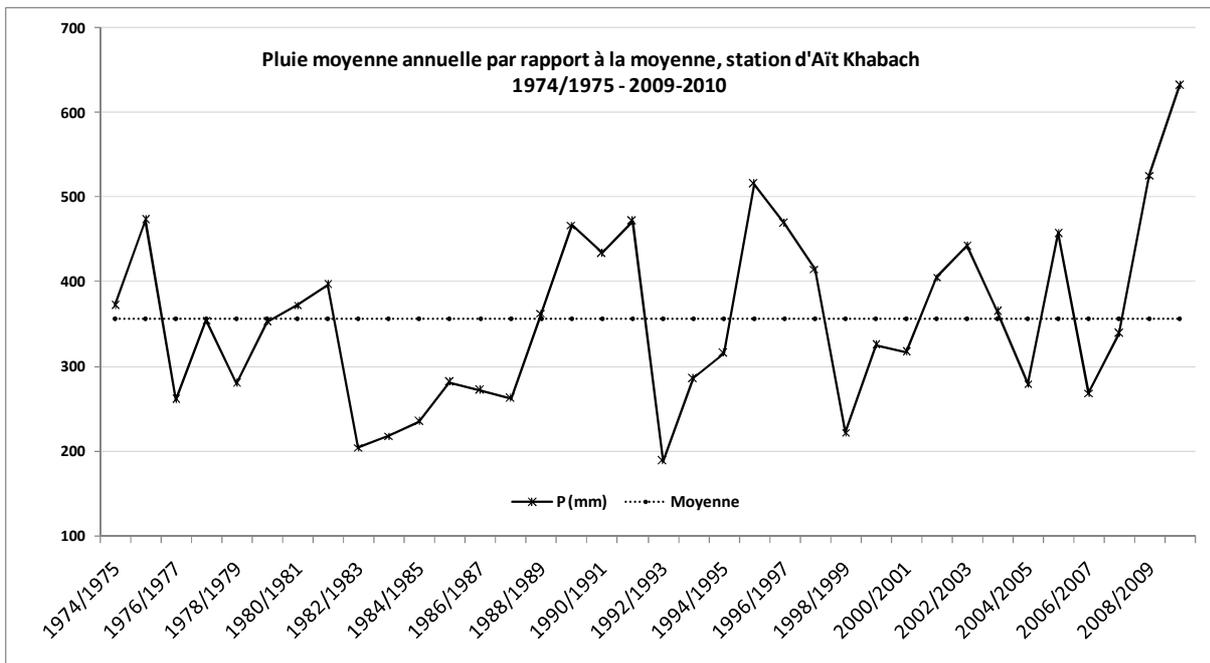
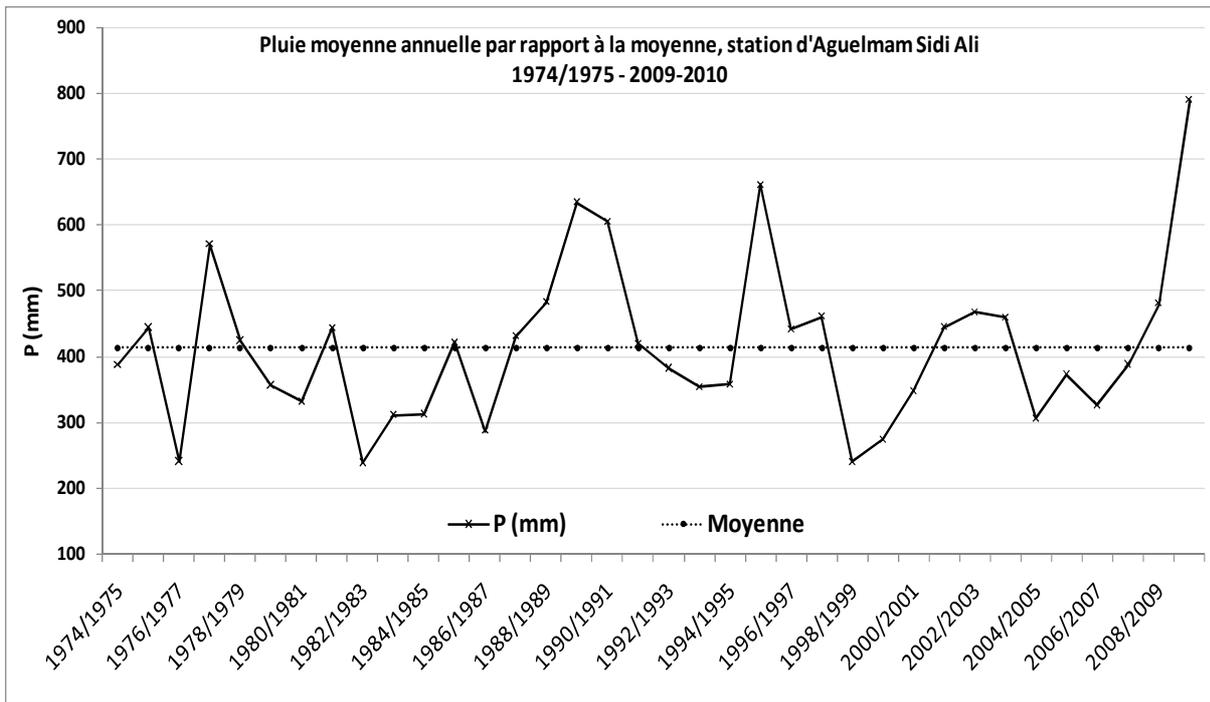
Annexe 3.4: Matrice des corrélations entre les stations pluviométriques (coefficients de détermination R²)

STATION	Aguelmam	Ain bétit	Ain louh	Ain timedrine	Aïtkhabach	Azrou	Azzaba	Bab boudir	Bab marzouka	Bab ouander	Boulemane	Dar al arsa	Dar lhamra	Elmers	Fes	Galez	Ifran	Missour	Pon mdez	Sefrou
Aguelmam		0.53	0.50	0.45	0.59	0.42	0.33	0.22	0.37	0.39	0.01	0.49	0.53	0.42	0.01	0.36	0.56	0.09	0.47	0.25
Ain bétit	0.52		0.68	0.62	0.62	0.56	0.81	0.31	0.71	0.45	0.43	0.85	0.79	0.46	0.07	0.62	0.85	0.13	0.58	0.72
Ain louh	0.50	0.62		0.45	0.48	0.45	0.64	0.27	0.46	0.57	0.19	0.65	0.70	0.48	0.06	0.25	0.74	0.05	0.43	0.58
A. Timdrin	0.45	0.45	0.55		0.49	0.33	0.50	0.22	0.43	0.20	0.41	0.48	0.80	0.64	0.20	0.26	0.54	0.20	0.79	0.65
A. Khabach	0.44	0.48	0.48	0.49		0.39	0.49	0.08	0.32	0.27	0.67	0.50	0.49	0.41	0.02	0.30	0.61	0.31	0.48	0.31
Azrou	0.41	0.56	0.45	0.33	0.39		0.44	0.18	0.67	0.52	0.18	0.53	0.48	0.32	0.00	0.55	0.76	0.08	0.22	0.44
Azzaba	0.33	0.81	0.50	0.64	0.49	0.44		0.17	0.59	0.26	0.31	0.69	0.86	0.45	0.02	0.60	0.66	0.14	0.71	0.73
Bab boudir	0.22	0.31	0.27	0.22	0.08	0.18	0.17		0.39	0.41	0.43	0.28	0.24	0.15	0.03	0.22	0.36	0.00	0.21	0.45
B.marzouka	0.37	0.71	0.46	0.43	0.32	0.67	0.59	0.39		0.59	0.14	0.80	0.67	0.39	0.07	0.74	0.73	0.03	0.24	0.68
B. Ouander	0.39	0.45	0.57	0.20	0.27	0.52	0.26	0.34	0.39		0.03	0.60	0.26	0.08	0.17	0.49	0.59	0.03	0.20	0.36
Boulemane	0.34	0.43	0.16	0.41	0.13	0.18	0.43	0.00	0.14	0.03		0.23	0.79	0.40	0.04	0.29	0.35	0.41	0.50	0.26
Dar el arsa	0.49	0.85	0.65	0.48	0.50	0.53	0.69	0.28	0.76	0.60	0.23		0.68	0.34	0.12	0.66	0.79	0.07	0.31	0.64
D. El hamra	0.52	0.79	0.70	0.85	0.57	0.56	0.88	0.22	0.67	0.26	0.50	0.50		0.76	0.18	0.53	0.76	0.25	0.81	0.83
El mers	0.41	0.66	0.48	0.64	0.41	0.32	0.45	0.15	0.39	0.09	0.40	0.40	0.63		0.14	0.31	0.44	0.30	0.57	0.44
Fes	0.07	0.08	0.06	0.20	0.02	0.00	0.11	0.03	0.07	0.00	0.04	0.04	0.18	0.14		0.00	0.03	0.01	0.06	0.18
Galez	0.36	0.62	0.25	0.36	0.30	0.55	0.60	0.22	0.07	0.49	0.29	0.29	0.55	0.31	0.00		0.66	0.29	0.17	0.39
Ifran	0.43	0.85	0.74	0.54	0.61	0.79	0.66	0.36	0.78	0.59	0.25	0.55	0.80	0.43	0.04	0.65		0.10	0.48	0.70
Missour	0.85	0.18	0.05	0.21	0.31	0.05	0.14	0.00	0.03	0.03	0.41	0.41	0.25	0.30	0.01	0.29	0.10		0.22	0.04
Pont mdez	0.47	0.58	0.43	0.79	0.48	0.22	0.71	0.21	0.24	0.20	0.50	0.50	0.81	0.57	0.06	0.21	0.48	0.22		0.51
Sefrou	0.25	0.72	0.58	0.65	0.31	0.44	0.73	0.45	0.68	0.36	0.26	0.26	0.83	0.44	0.18	0.39	0.70	0.03	0.51	

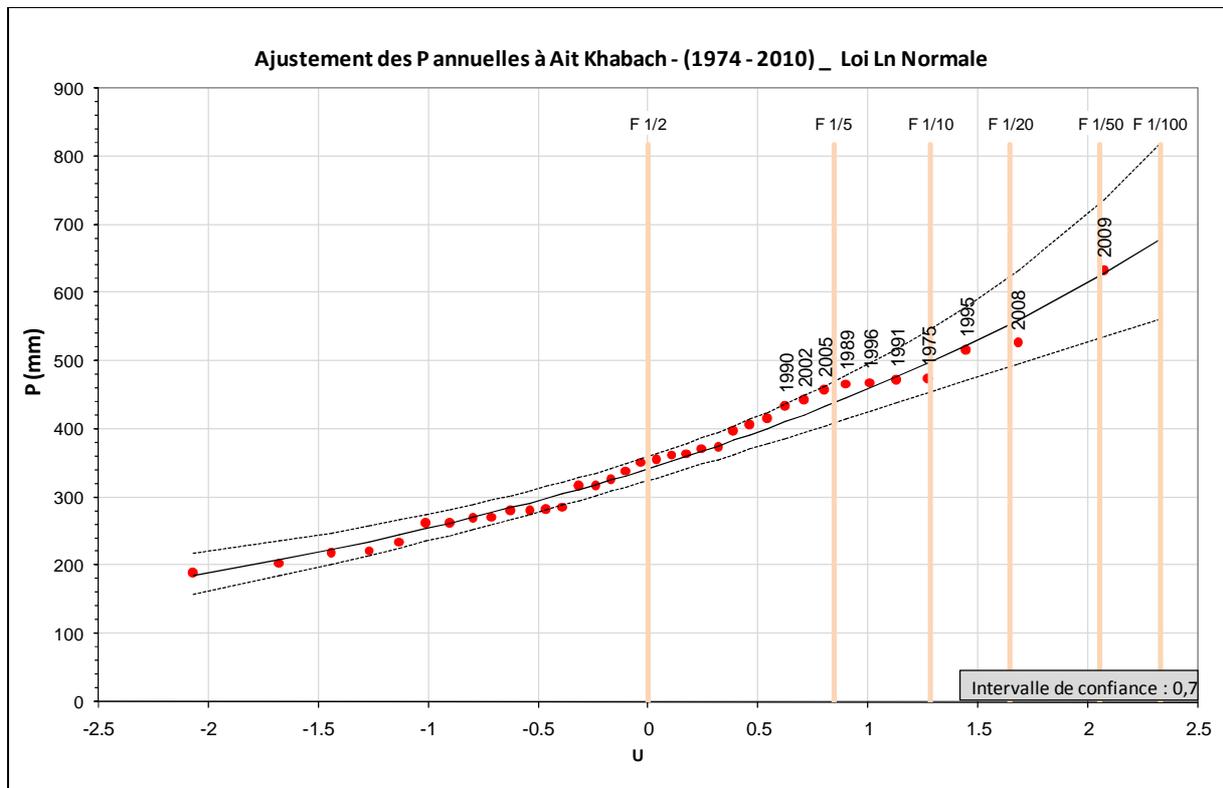
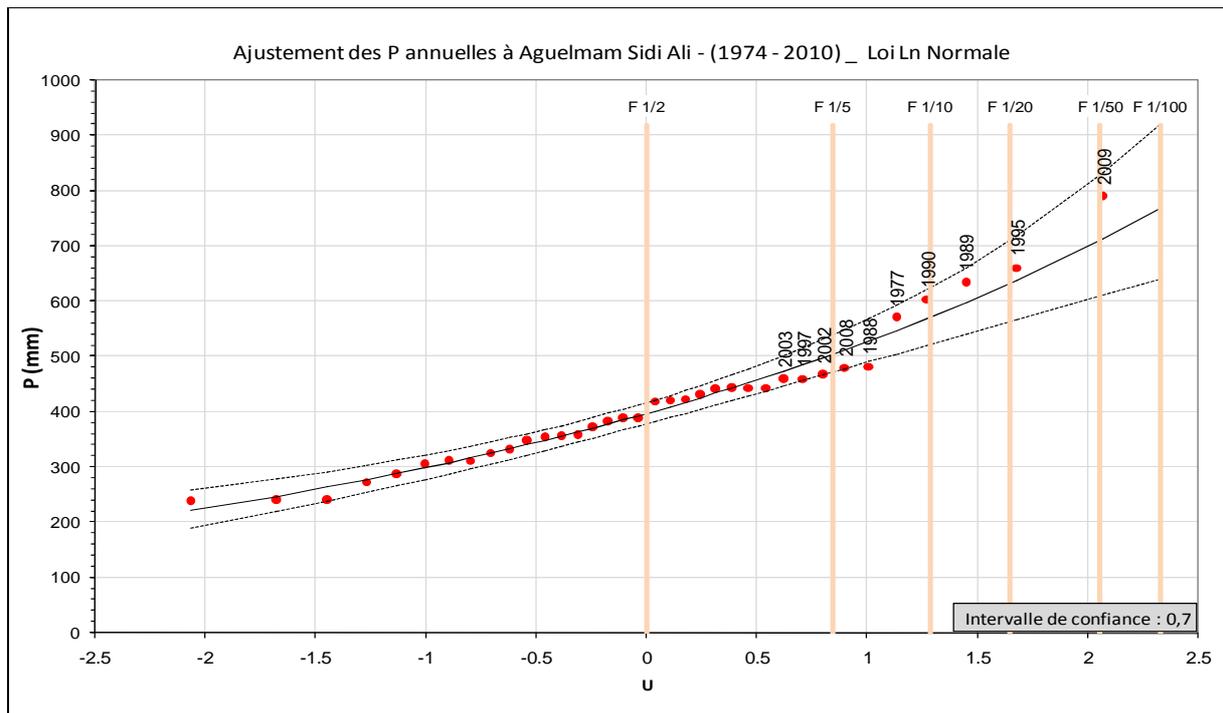
Annexe 3.5 : Climagramme illustrant les gradients bioclimatiques dominant dans la zone d'étude à partir de quatre stations couvrant l'amont le médian et l'aval du bassin versant.

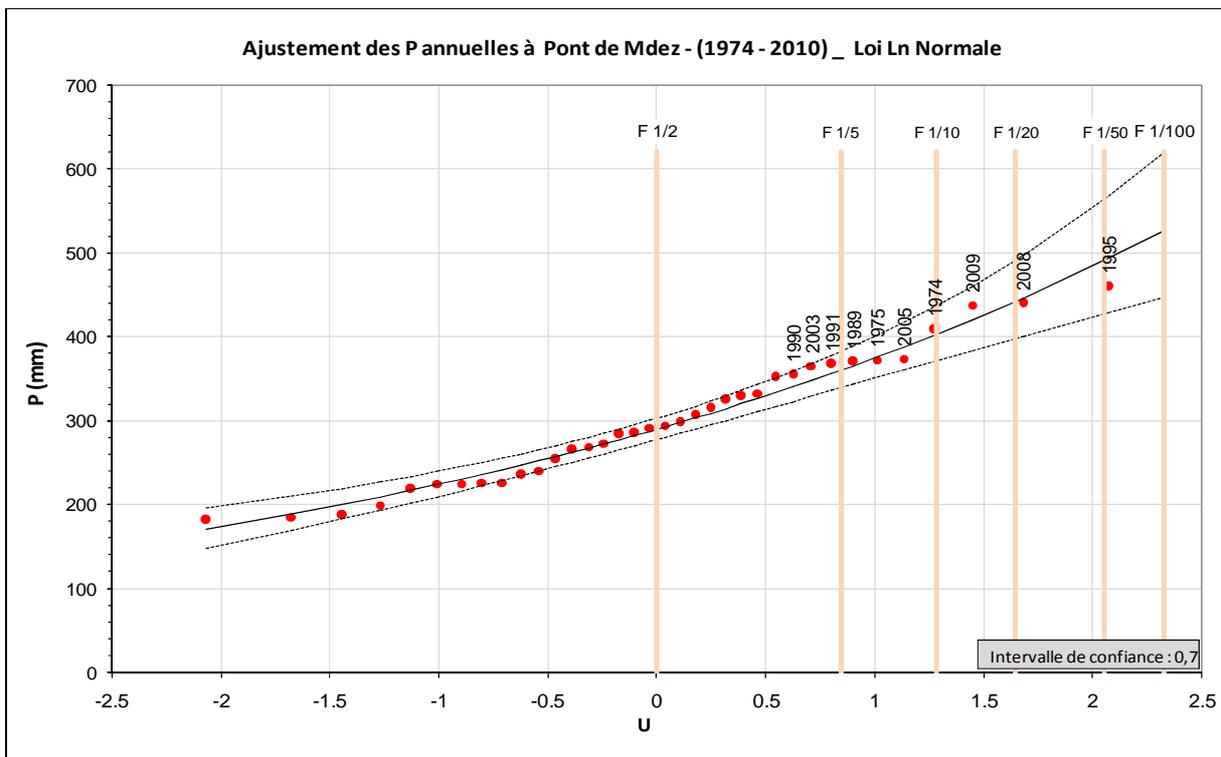
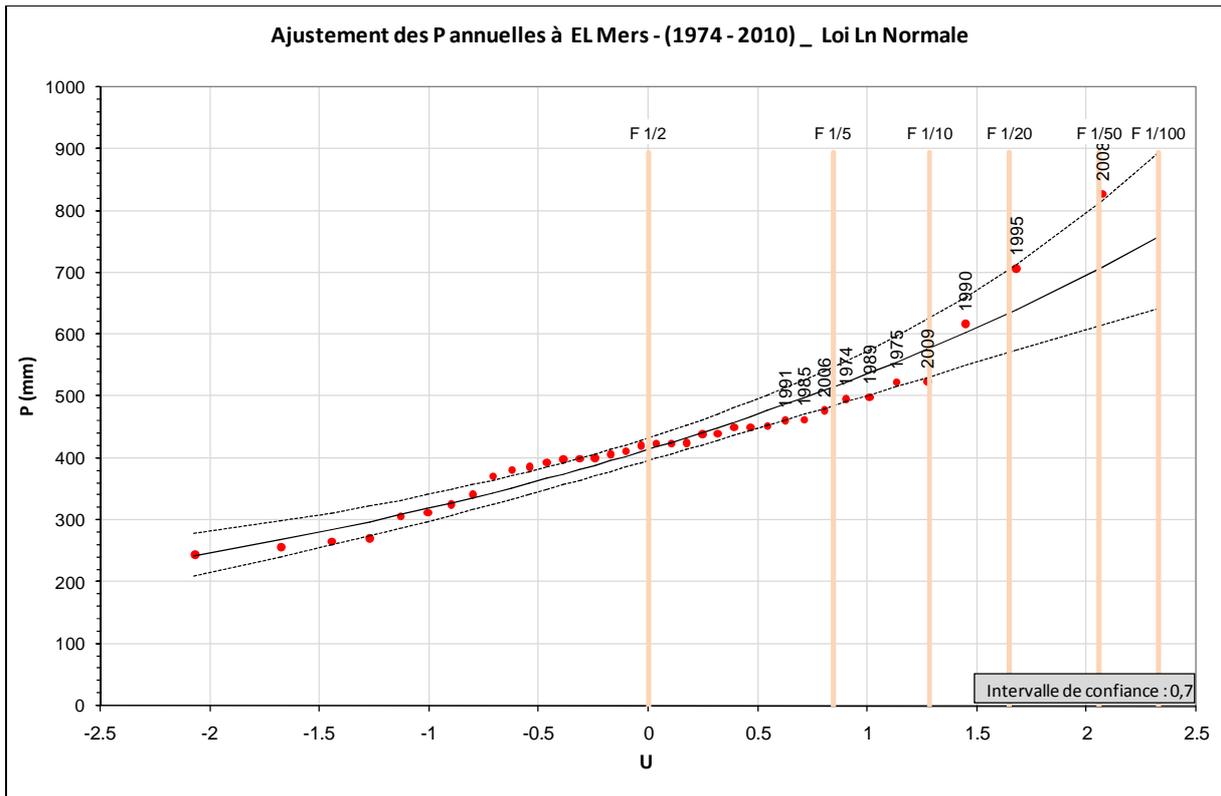


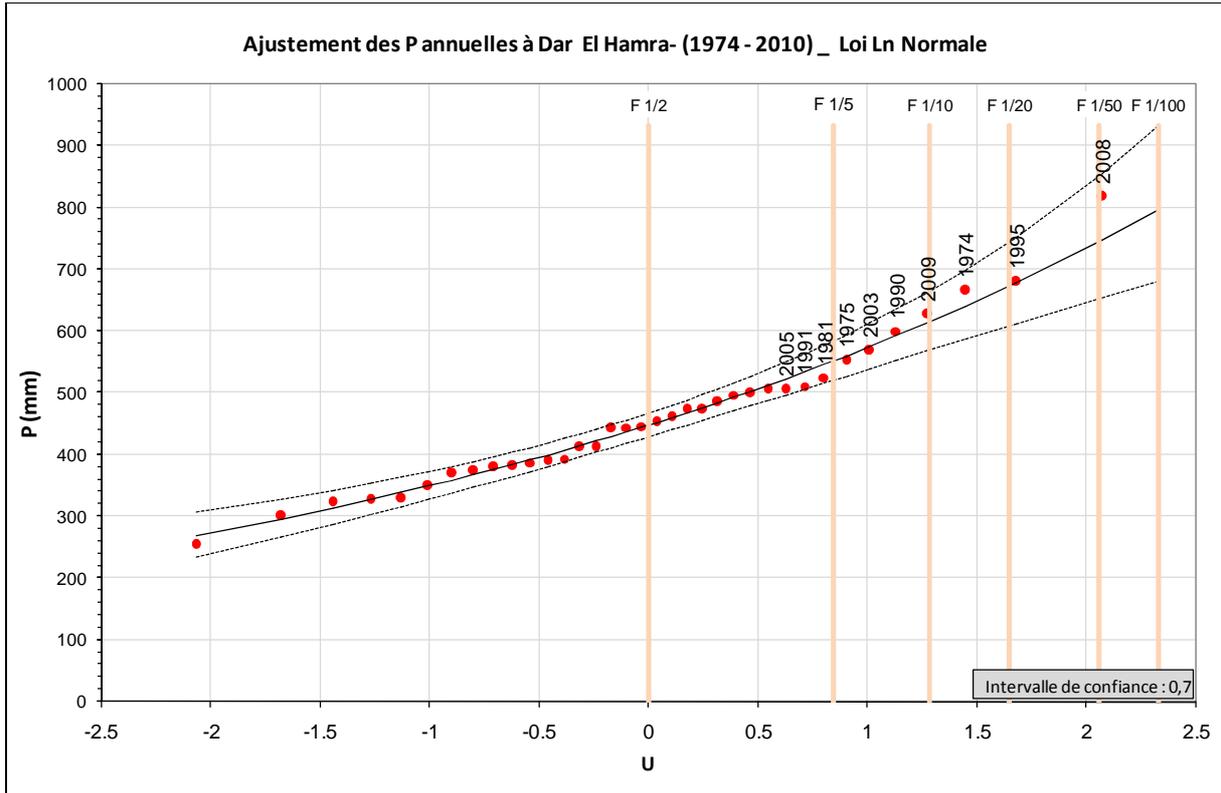
Annexe 3.6 : Précipitations annuelles moyennes à la station d'Aguelmam Sidi Ali et d'Aïtkhabach



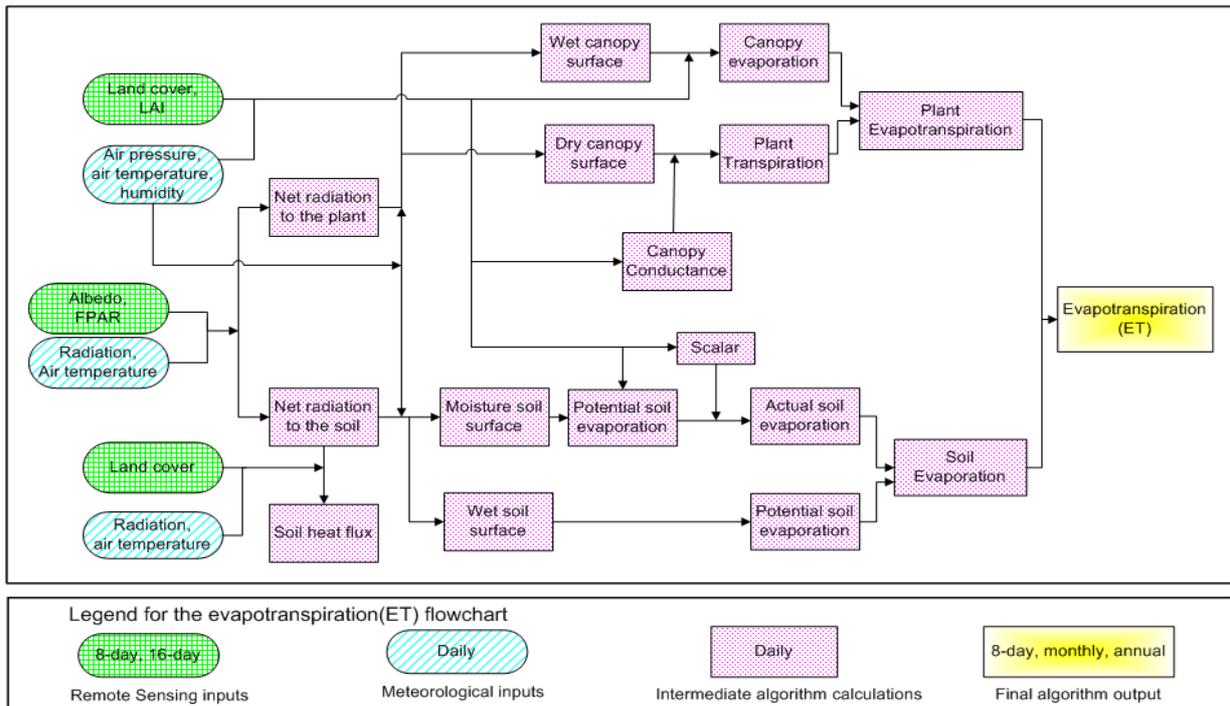
Annexe 3.7 : Ajustement statistique des pluies annuelles à la station de Boulmane







Annexe 3.8 : Organigramme montrant la logique qui sous-tend l'algorithme de calcul de l'évapotranspiration "MODIS" (Qiaozhen et al., 2007)



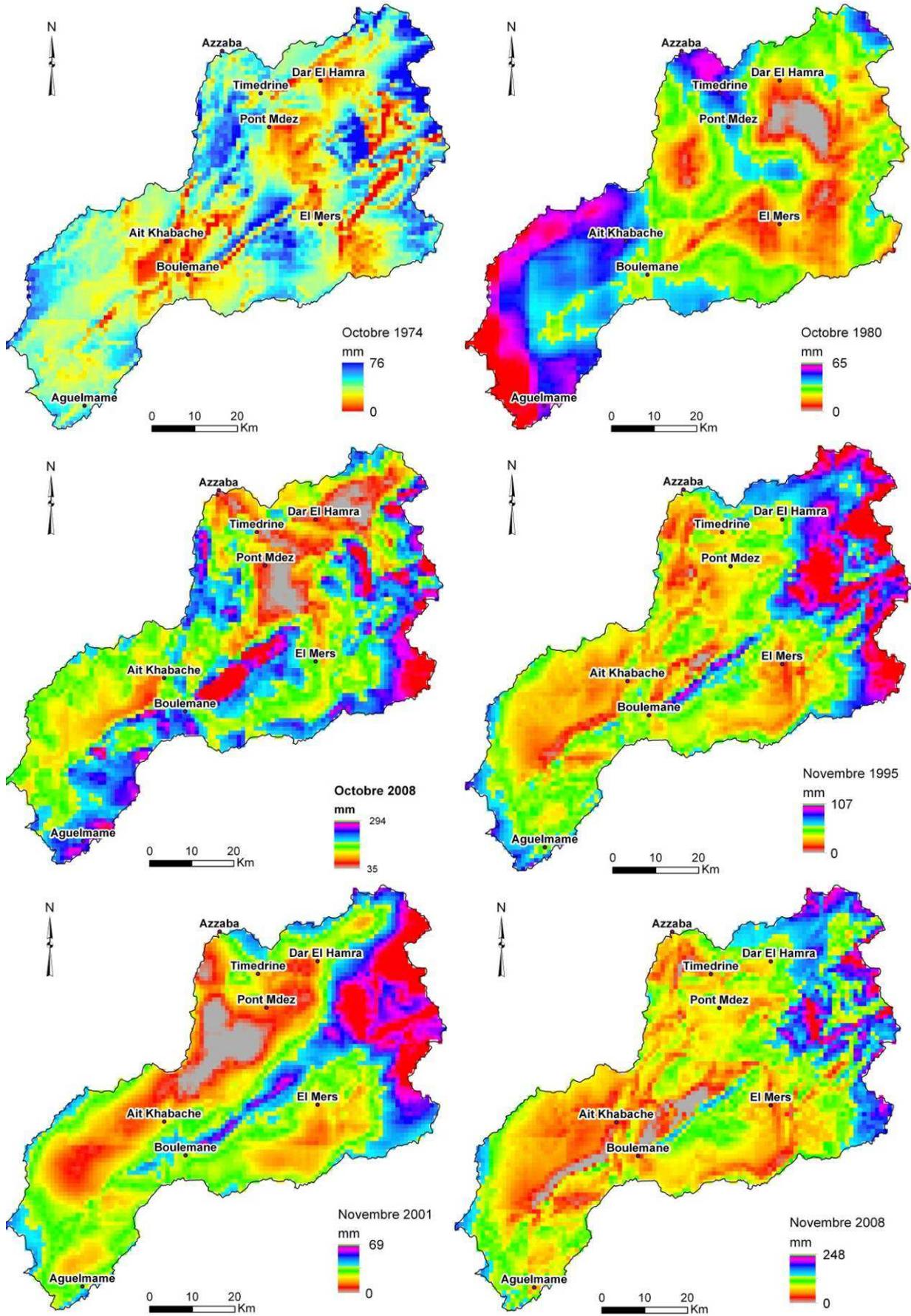
Annexe 3.9 : spatialisation des pluies**- Spatialisation des pluies annuelles**

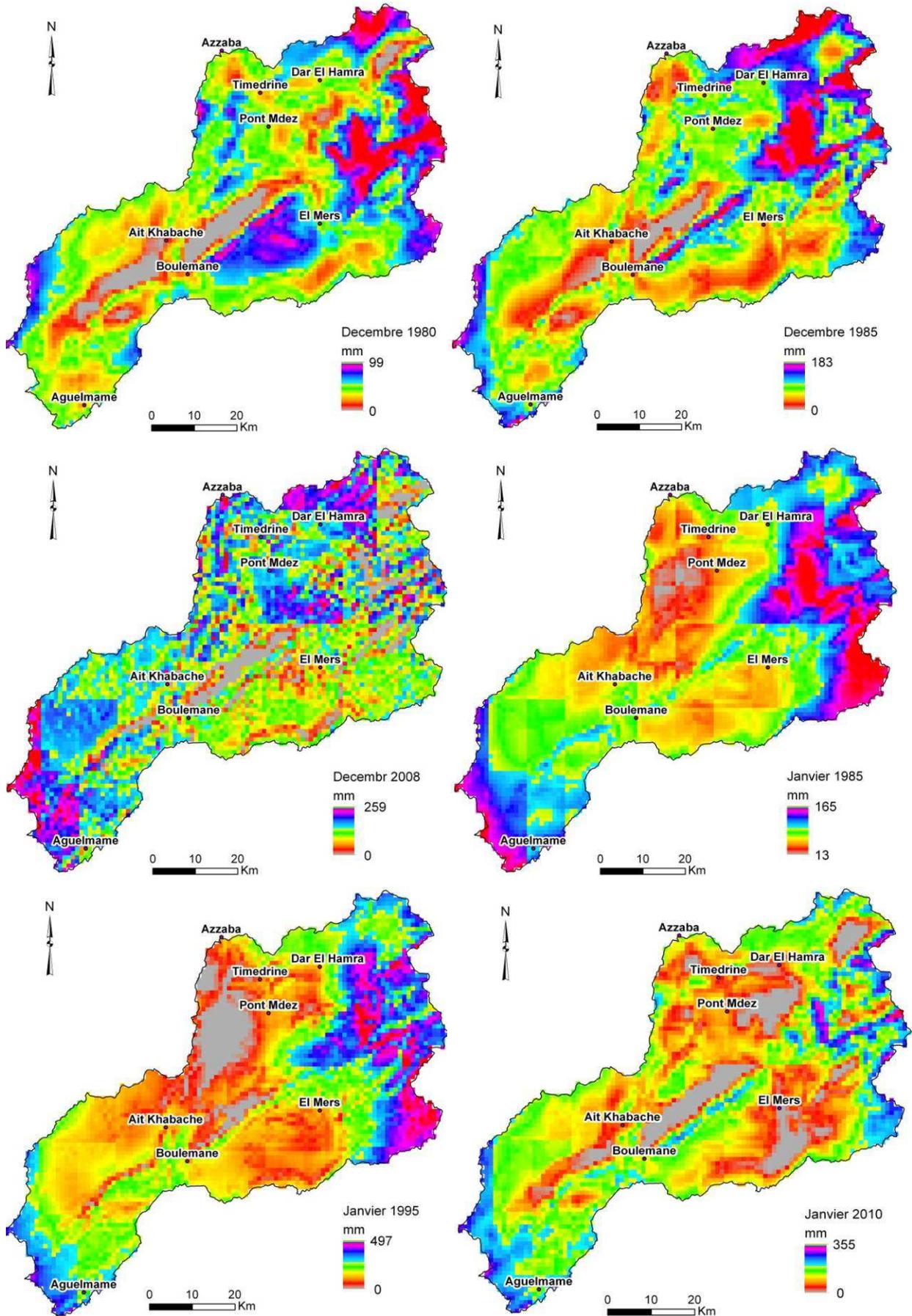
	Haut Sebou	Mâasser	Zloul	Mdez	Aïtkhabach
1974/2010	500.73	515.64	591.46	497.76	517.4
1974/1975	530.67	538.33	611.96	522.89	528.19
1975/1976	577.6	624.41	658.02	580.98	584.47
1976/1977	502.47	516.99	561.74	506.53	560.22
1977/1978	551.28	589.11	639.12	547.86	555.81
1978/1979	469.65	498.14	589.55	456.83	457.35
1979/1980	521.64	549.16	628.76	511.39	513.16
1980/1981	470.63	491.78	585.39	457.31	465.77
1981/1982	524.79	532.18	620.19	514.23	521.2
1982/1983	398.07	407.01	431.24	396.66	408.84
1983/1984	407.78	388.46	512.25	396.84	433.53
1984/1985	372.19	387.39	423.38	374	413.31
1985/1986	511.54	548.86	737.22	484.47	470.79
1986/1987	374.96	381.37	481.27	364.5	373.78
1987/1988	497.26	520.28	607.54	472.8	414.73
1988/1989	573.83	622.07	713.81	566.52	539.21
1989/1990	591.01	629.42	700.18	587.3	573.81
1990/1991	627.6	699.98	748.61	614.52	606.7
1991/1992	615.39	659.01	774.37	593.85	546.92
1992/1993	184.74	138.68	238.5	167.69	181.457
1993/1994	490.24	529.03	629.99	474.04	444.28
1994/1995	383.71	461.81	451.474	384.79	344.61
1995/1996	824.91	898.98	1077.66	805.19	787.59
1996/1997	964.58	997.84	1097.77	939.84	842
1997/1998	629.56	714.91	769.27	626.29	590.24
1998/1999	298.51	314.8	373.43	291.34	280.18
1999/2000	350.24	385.63	359.16	364.87	392.21
2000/2001	482.15	566.28	530.78	489.85	455.23
2001/2002	550.67	602.57	666	547.1	510.3
2002/2003	555.31	542.4	663.02	553.65	627.32
2003/2004	581.26	597.48	691.55	575.3	596.66
2004/2005	337.8	343.12	395.63	333.69	341.72
2005/2006	531.18	504.96	640.07	517.32	545.02
2006/2007	401.68	468.84	454.63	403.23	373.55
2007/2008	420.91	479.69	499.53	413.47	362.56
2008/2009	926.23	1032.26	1135.21	908.82	854.31
2009/2010	808.76	781.79	926.92	807.4	906.11

- **Spatialisation des pluies mensuelles (Haut Sebou)**

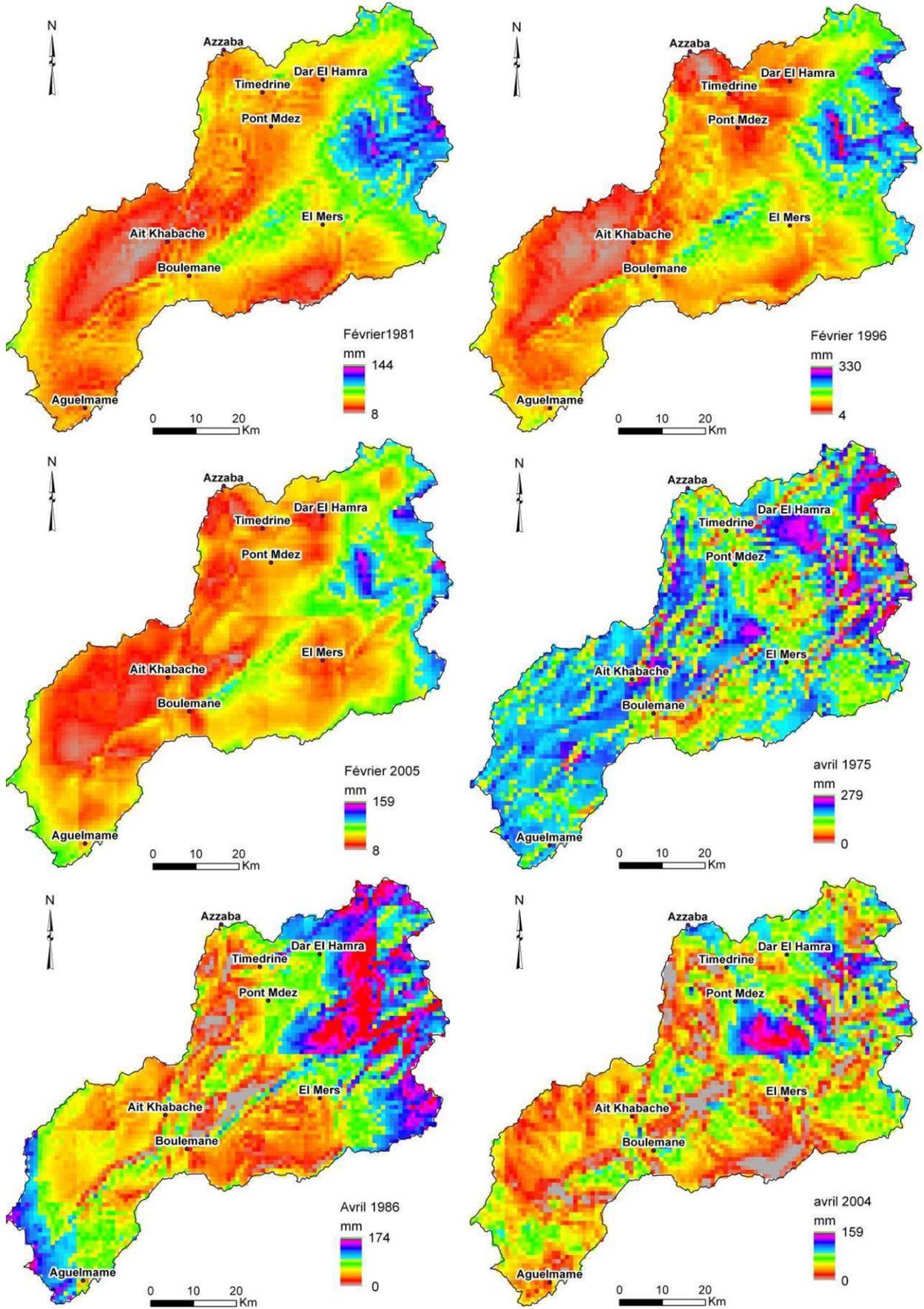
	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
1974/1975	12.62	39.77	20.97	4.09	168.06	64.32	90.54	143.1	67.14	46.84	12.49	15.51
1975/1976	24.02	5.62	44.75	76.45	19.9	82.81	58.5	124.02	130.21	25.51	14.2	6.36
1976/1977	21.24	110.63	11.36	142.37	92.66	70.43	45.12	17.32	47	7.93	1.05	2.46
1977/1978	25.71	73.19	54.99	49.24	55.57	91.68	27.85	84.63	62.52	18.88	2.75	18.98
1978/1979	8.15	17.73	22.55	63.13	70.62	176.63	42.49	22.52	40.24	14.84	4.65	5.4
1979/1980	75.06	101.67	49.84	15.1	37.26	40.24	78.92	43.38	45.66	6.03	1.27	15.69
1980/1981	59.07	29.14	78.81	28.58	24.21	49.43	67.33	68.08	28.56	26.38	5.28	5.4
1981/1982	12.64	29.29	10.51	47.69	42.64	55.93	35.38	118.54	112.98	18	8.17	14.14
1982/1983	23.7	69.96	45.71	48.8	7.19	42.95	44.85	36.19	18.86	8.62	0.69	5.06
1983/1984	5.48	23.95	73.31	68.82	16.22	11.4	39.48	57.87	93.93	14.84	3.6	1.67
1984/1985	8.6	2.04	78.5	11.19	83.72	22.79	32.37	32.86	70.63	2.9	8.15	1.3
1985/1986	9.39	15.79	49.83	54.3	72.88	75.74	66.18	55.19	13.59	198.48	7.82	12.1
1986/1987	10.83	35.43	27.88	20.24	80.13	99.5	4.83	8.01	21.58	18.13	18.13	5.69
1987/1988	42.22	24.08	70.97	33.54	53.35	83.79	39.43	30.99	47.21	11.79	3.042	3.24
1988/1989	14.54	60.72	78.09	9.35	16.18	59.71	47.95	96	24.01	34.63	10.89	34.64
1989/1990	29.84	67.67	89.06	100.23	56.58	6.07	34.48	74.09	51.02	7.09	31.72	11.94
1990/1991	61.19	18.18	52.77	105.98	10.52	72.85	145.59	55.58	15.5	19.21	17.1	18.94
1991/1992	62.56	69.51	18.29	35	2.42	36.21	68.7	80.41	69.86	83.61	5.72	34.46
1992/1993	8.97	45.47	16.19	16.19	15.86	46.74	60.5	66.81	27.76	7.15	1.76	8.03
1993/1994	11.1	24.31	142.92	28.03	50.39	100.81	32.19	16.18	15.63	1.14	6.52	11.86
1994/1995	51.25	29.93	33.14	5.61	188.38	47.61	66.28	88.55	14.58	36.36	3.95	13.15
1995/1996	30.95	73.08	33.14	117.13	188.38	101.25	108.43	67.72	67.72	61.99	7.59	4.54
1996/1997	34.08	29.22	22.03	219.75	95.57	3.89	20.63	119.98	49.68	10.94	0.85	18.14
1997/1998	127.63	29.42	116.37	72.02	55.34	66.54	20.74	19.89	39	19.01	4.6	16.8
1998/1999	38.7	7.71	3.18	58.04	70.58	39.23	49	5.11	24.14	6.1	1.82	14.23
1999/2000	42.5	44.19	56.68	74.4	20.28	3.27	2.73	47.69	54.16	4.56	1.96	14.62
2000/2001	27.43	134.85	31.88	103.9	64.34	13.54	21.23	9.99	35.88	2.18	1.09	12.22
2001/2002	19.94	24.77	21.61	107.51	9.35	14.48	60.59	139.08	51.11	2.3	2.17	13.29
2002/2003	19.15	64.54	130.07	35.47	67.7	41.58	53.41	64.85	46.15	16.93	14.75	15.33
2003/2004	2.27	76.88	104.77	103.79	13.95	40.9	39.29	47.39	93.06	13.66	6.02	3.13
2004/2005	22.91	42.71	54.65	57.97	6.54	52.02	51.24	5.66	7.39	37.37	2.3	7.8
2005/2006	7.9	69.6	59.58	36.1	61.14	81.58	45.95	44.62	93.19	20.81	22.36	10.83
2006/2007	4.42	23.34	48.33	39.54	20.76	31.61	32.07	101	32.01	10.98	11.11	10.84
2007/2008	20.36	56.14	53.07	13.88	51.58	70.1	8.82	21.06	63.43	2.37	9.33	11.12
2008/2009	83.47	140.01	88.75	105.97	104.98	84.2	101.42	9.13	15.98	38.97	4.25	6.27
2009/2010	132.1	18.72	32.85	135.94	121.08	116.58	134.58	70.83	25.82	11.74	33.48	40.89

- **Cartographie des pluies mensuelles**

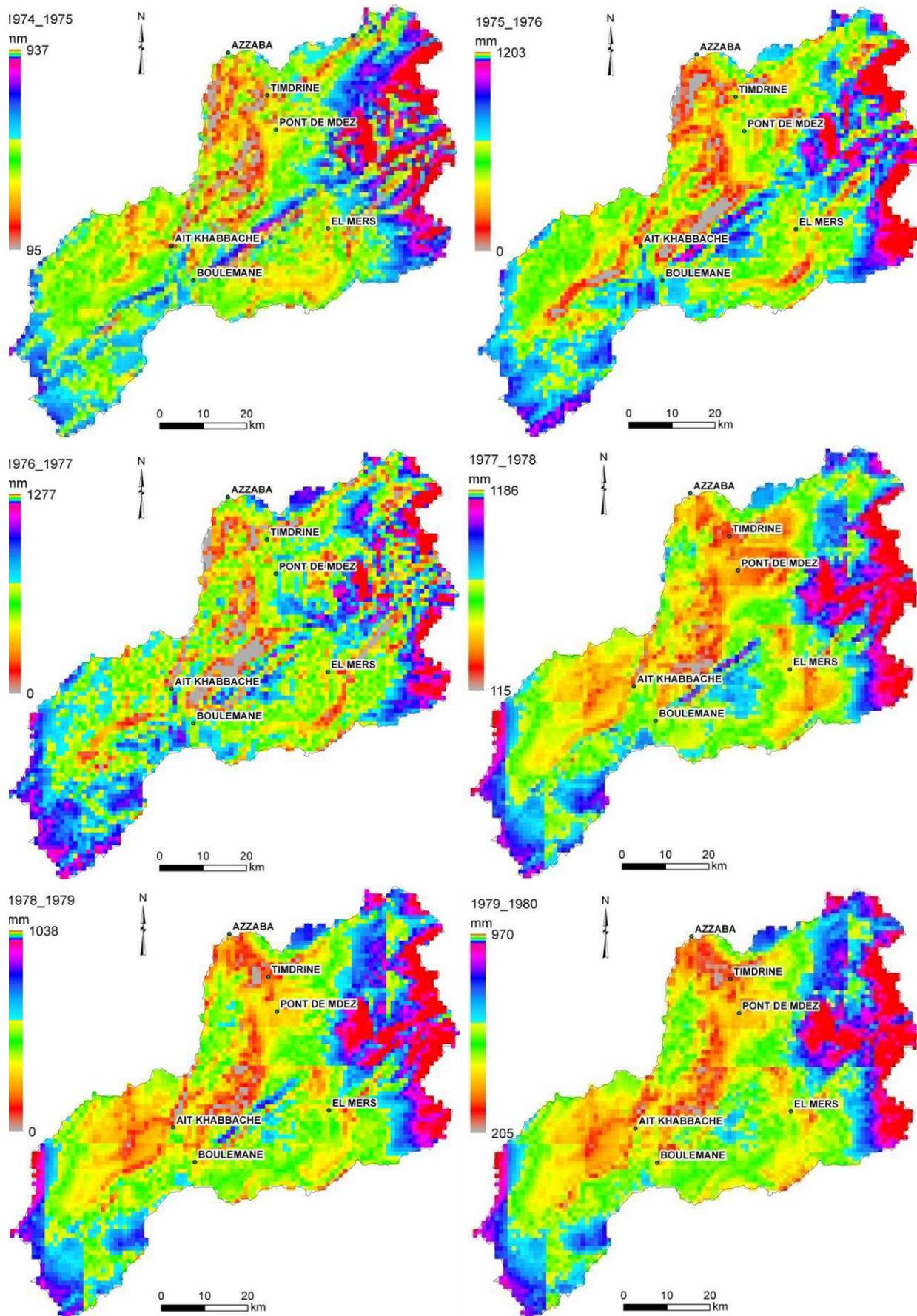


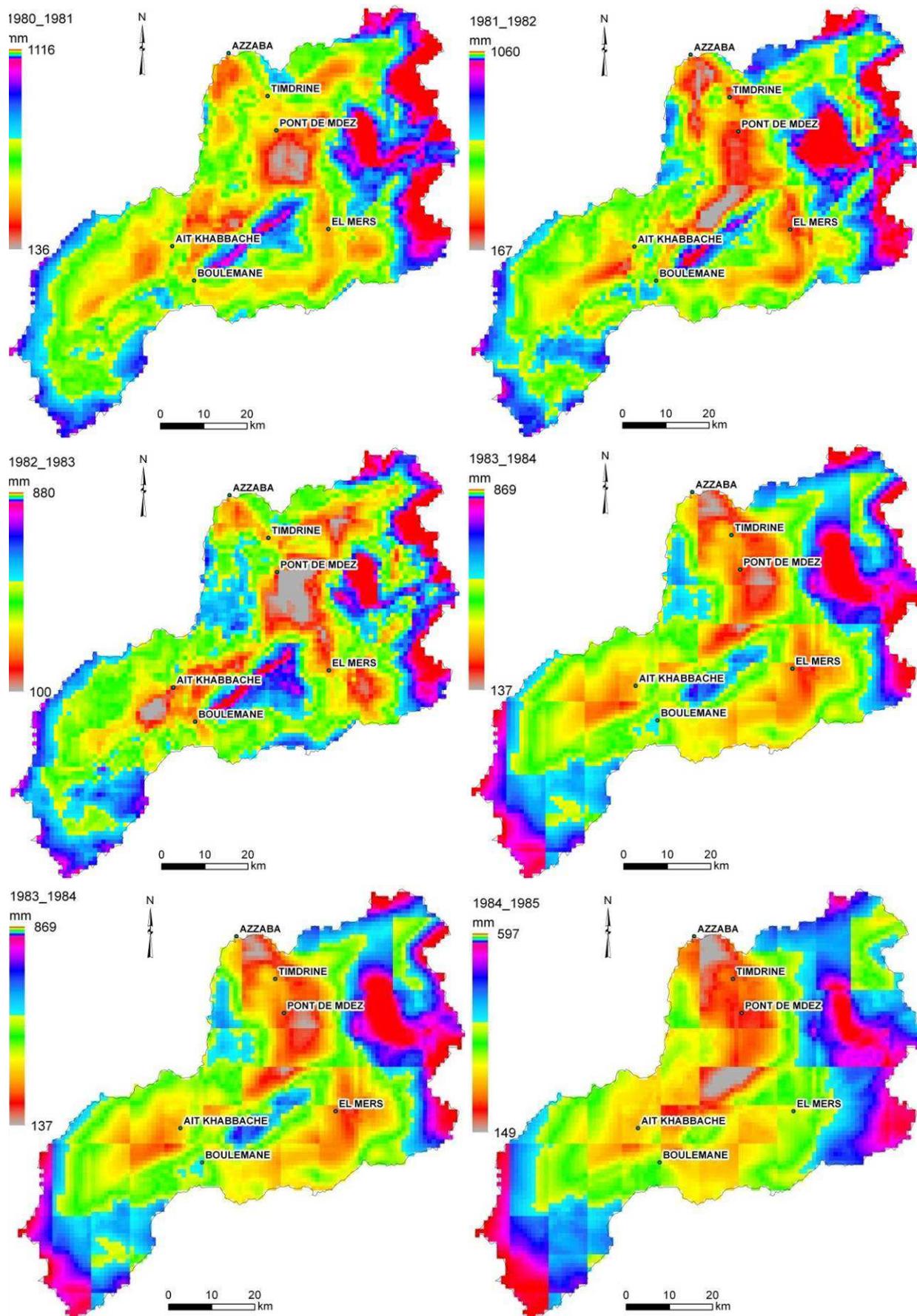


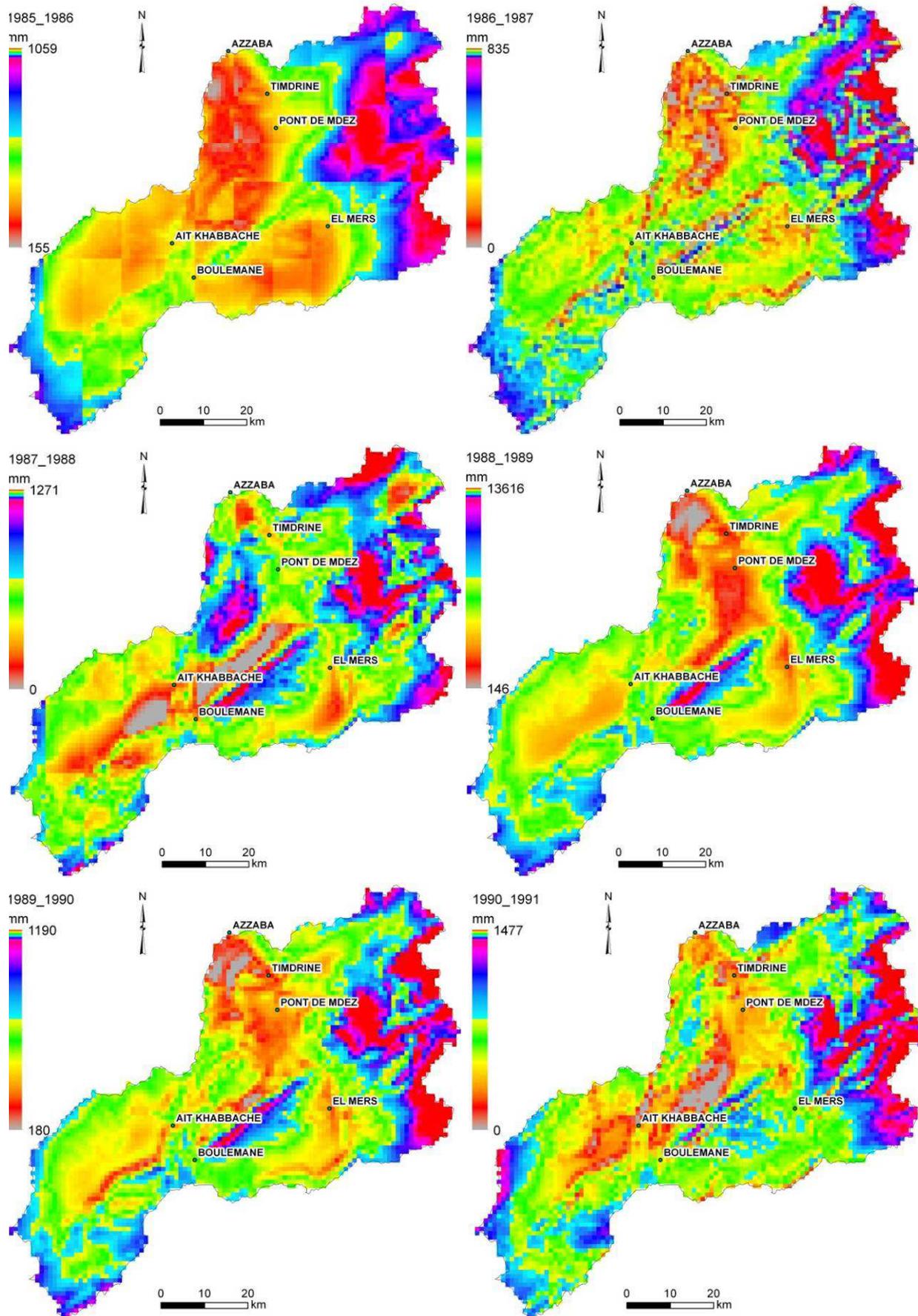
Annexes

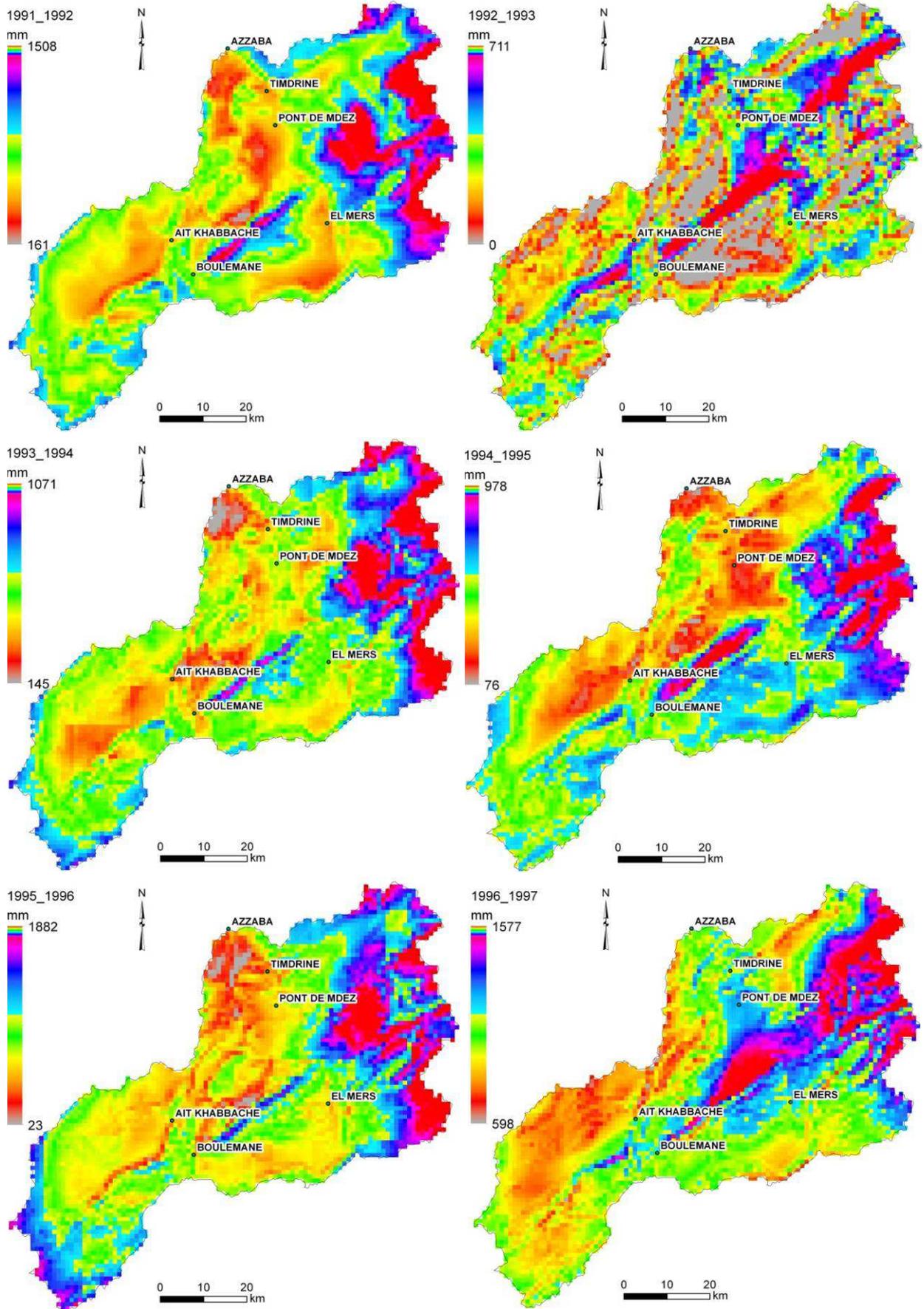


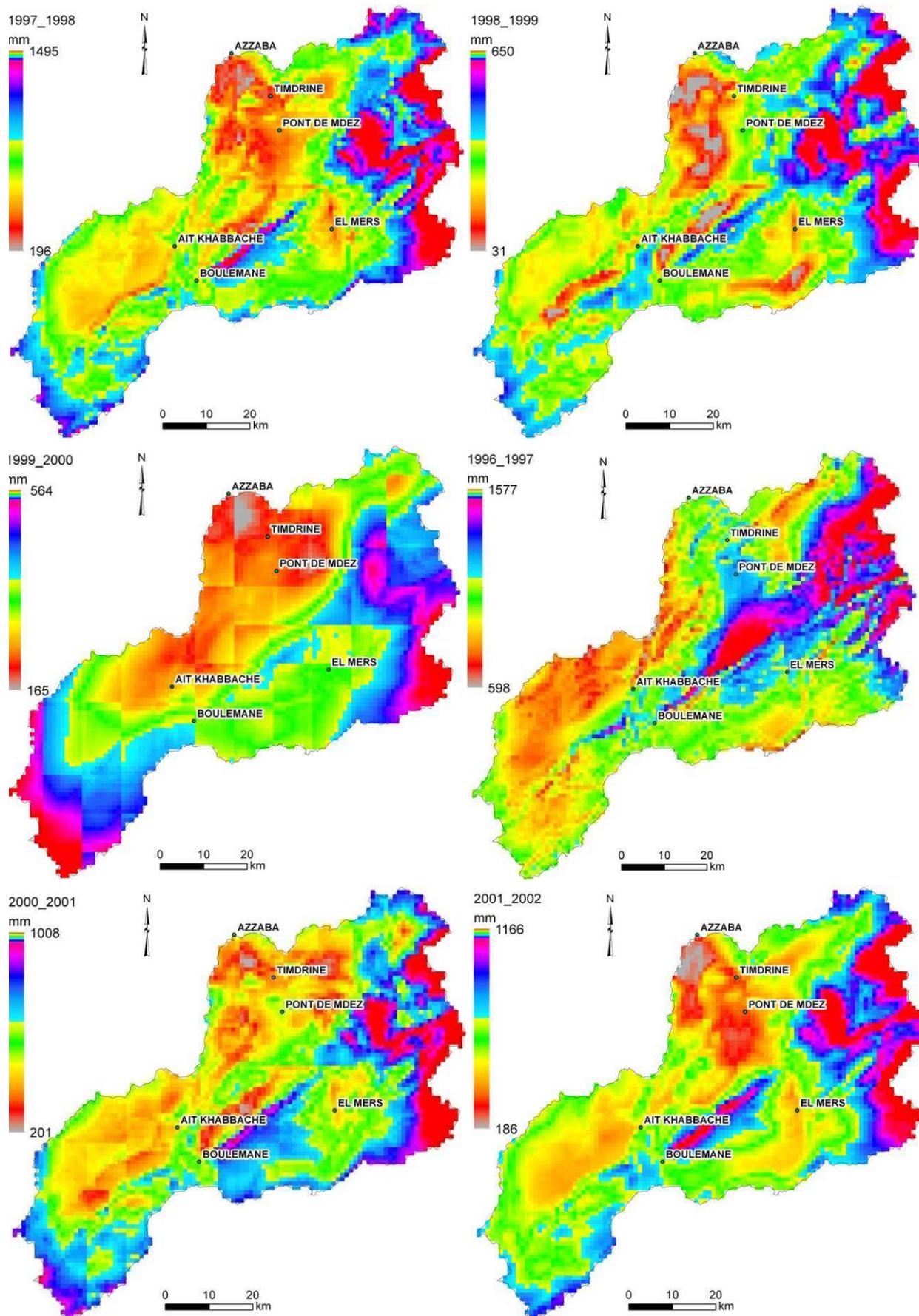
- Cartographie des pluies annuelles

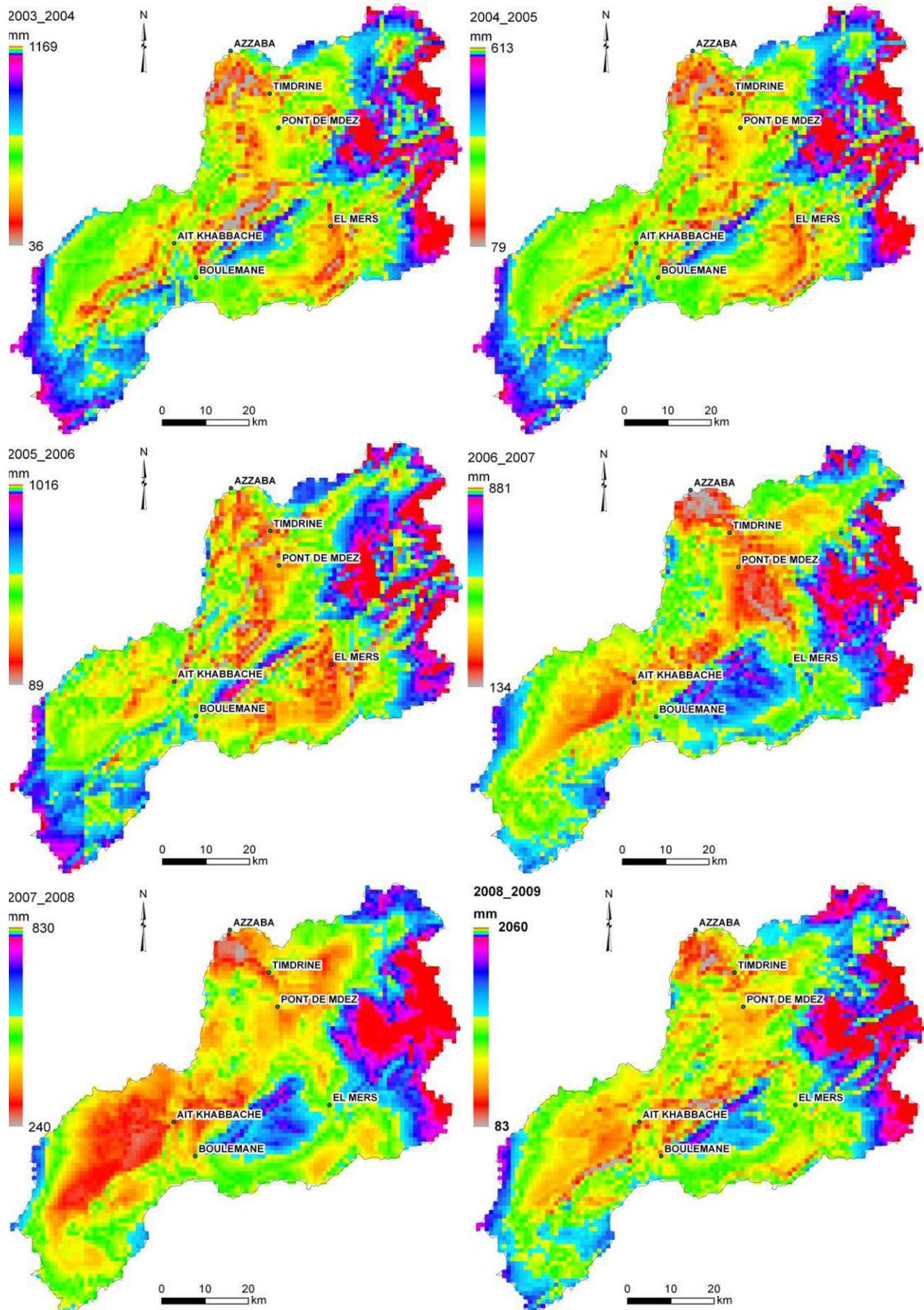




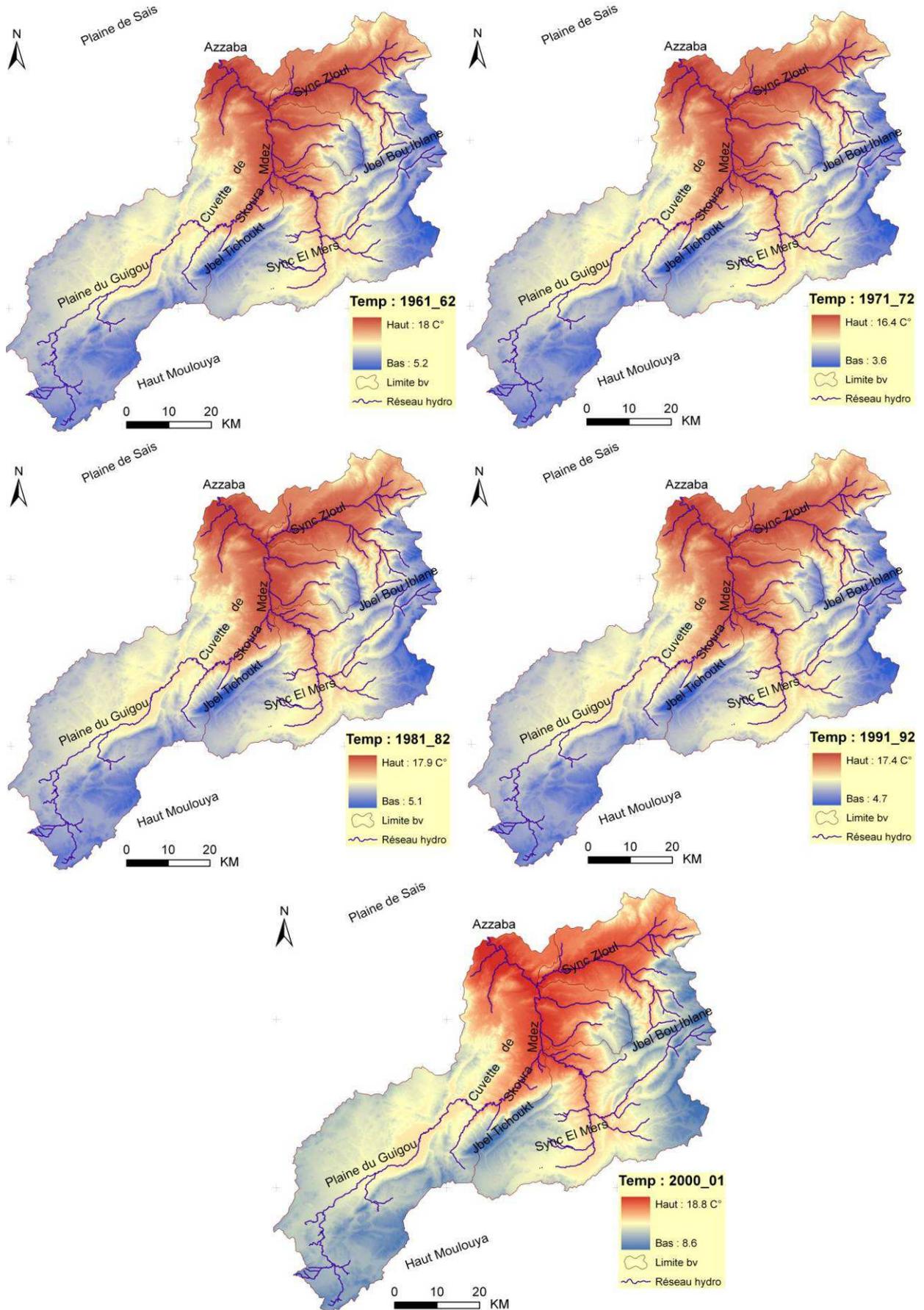




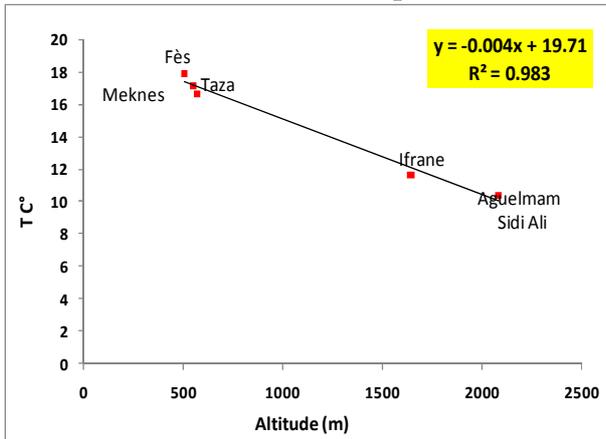




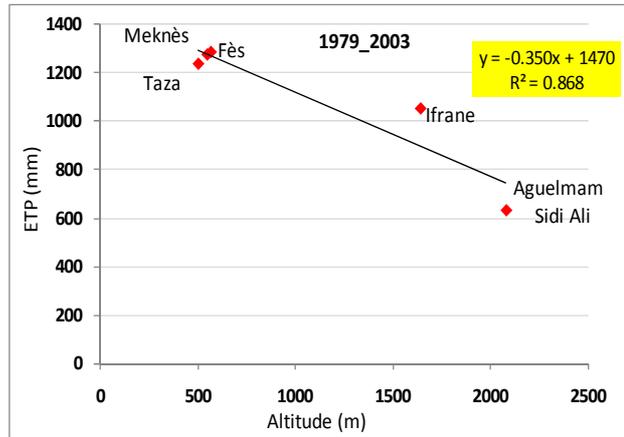
Annexe 3.10: Spatialisation interannuelle des températures



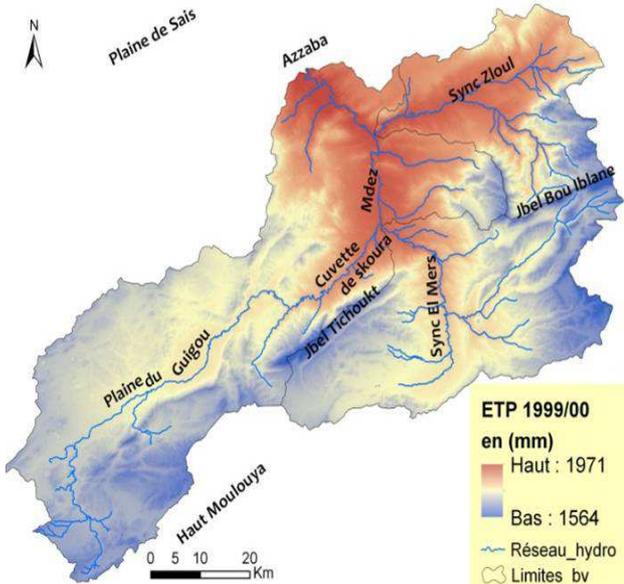
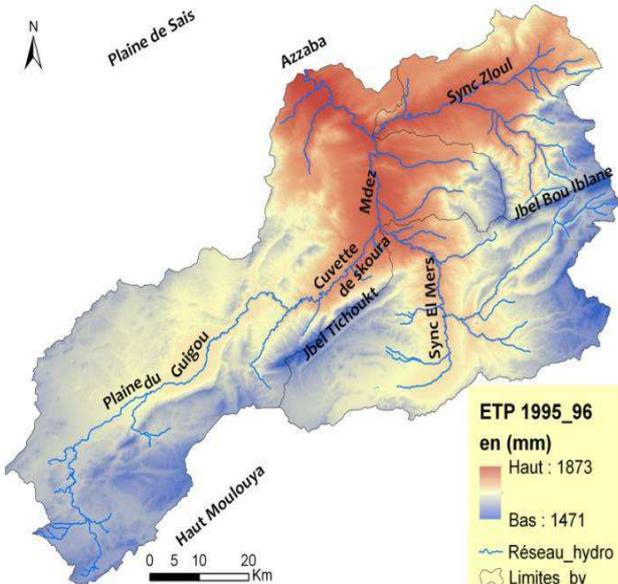
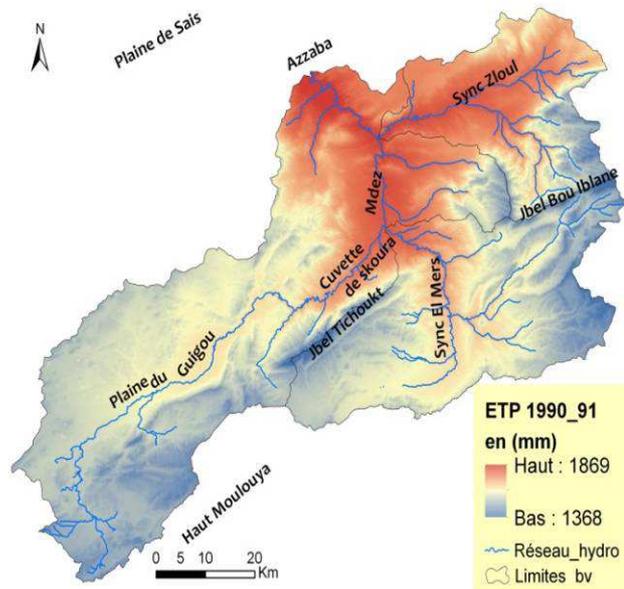
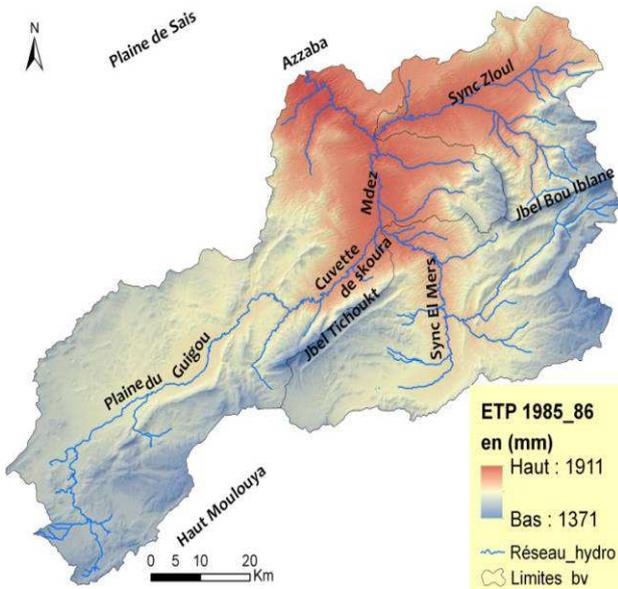
Annexe 3.11 : Gradient thermique



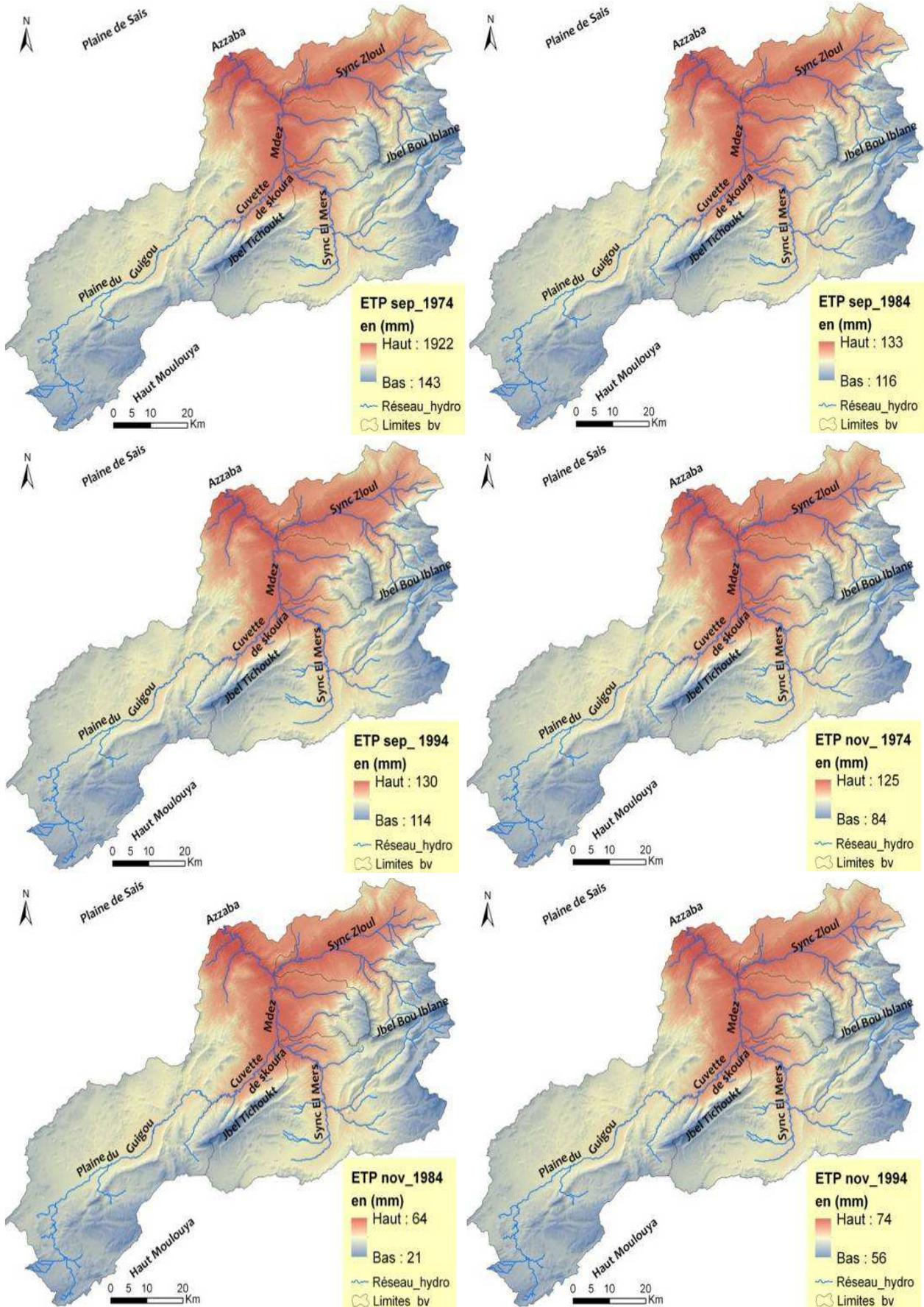
Annexe 3.12 : Relation ETP/altitude

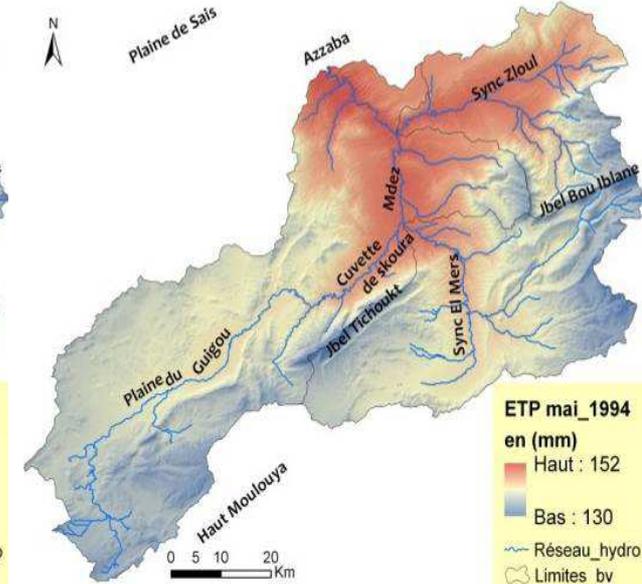
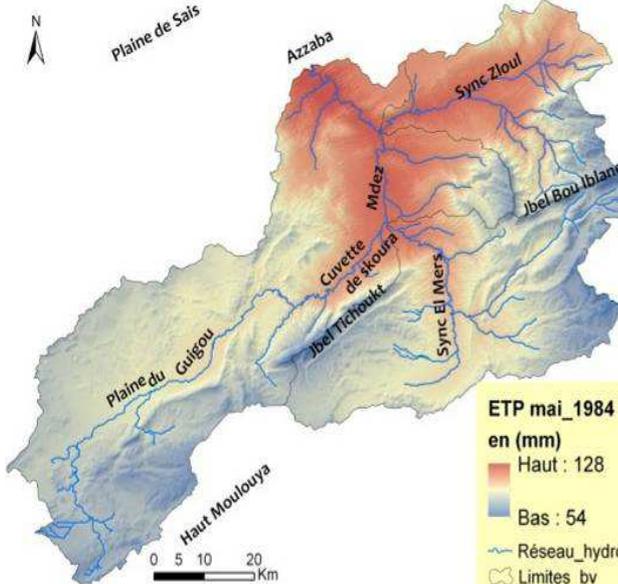
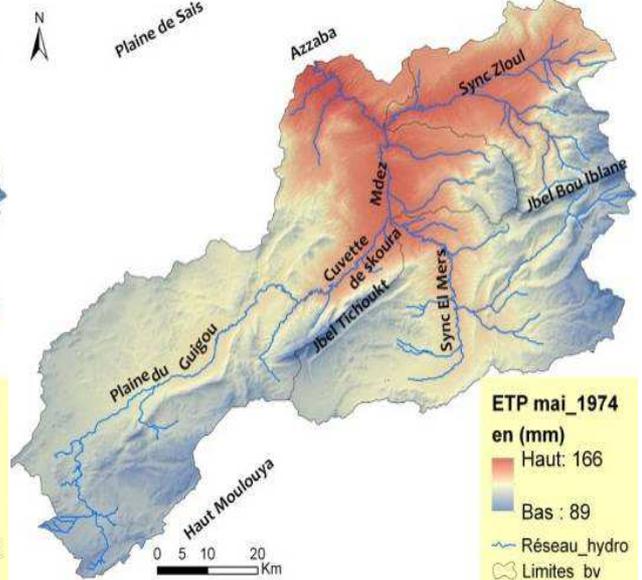
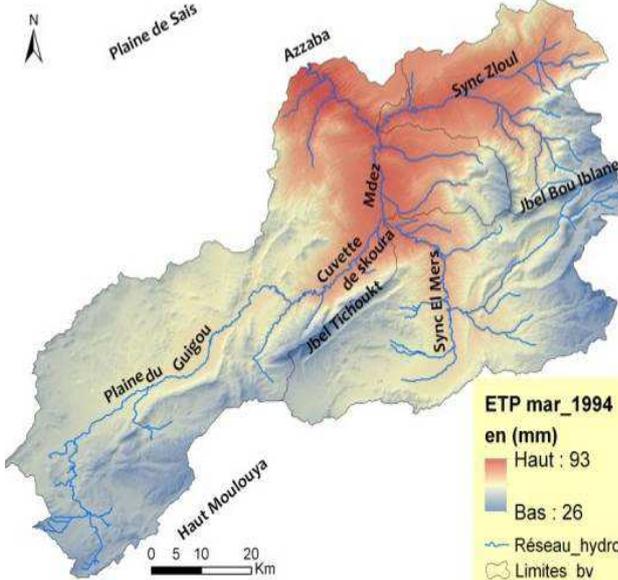
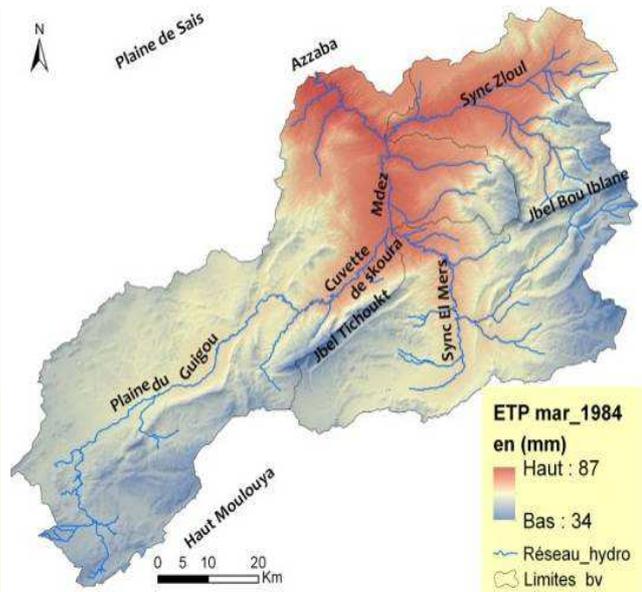
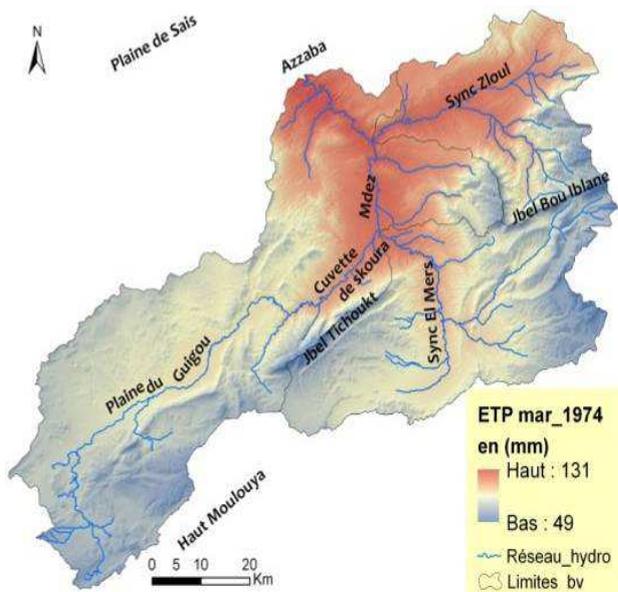


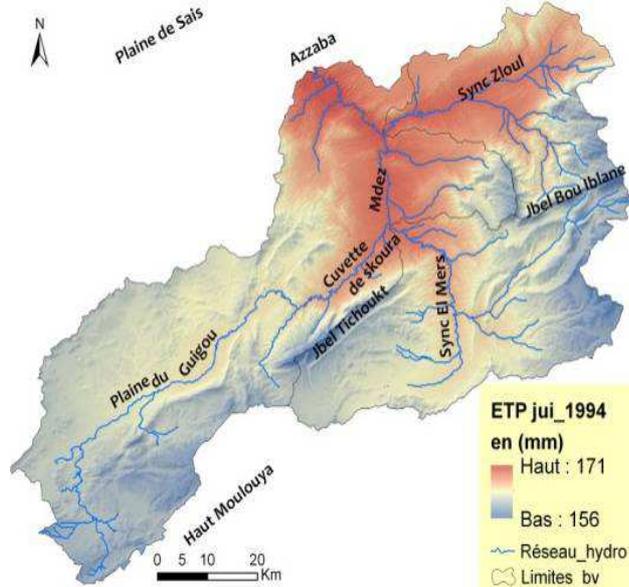
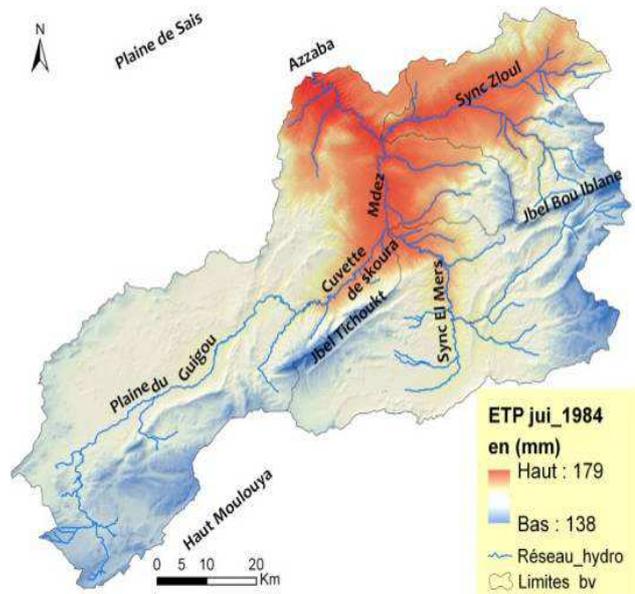
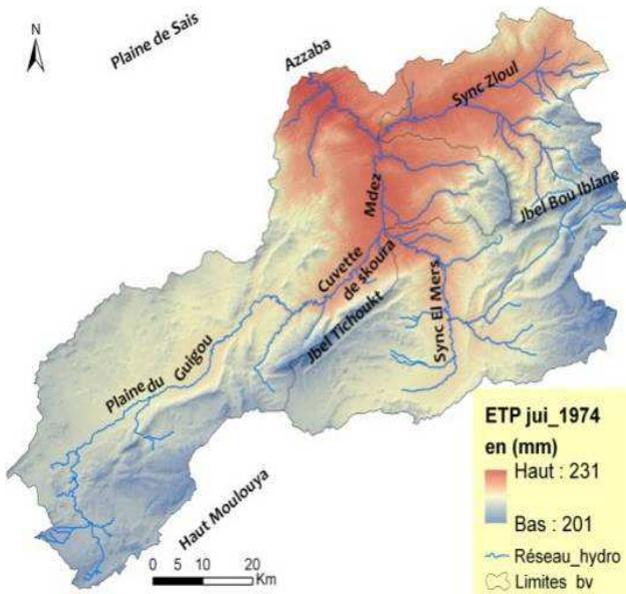
Annexe 3.12: Spatialisation interannuelle d'ETP



Annexe 3.13: Spatialisation mensuel d'ETP

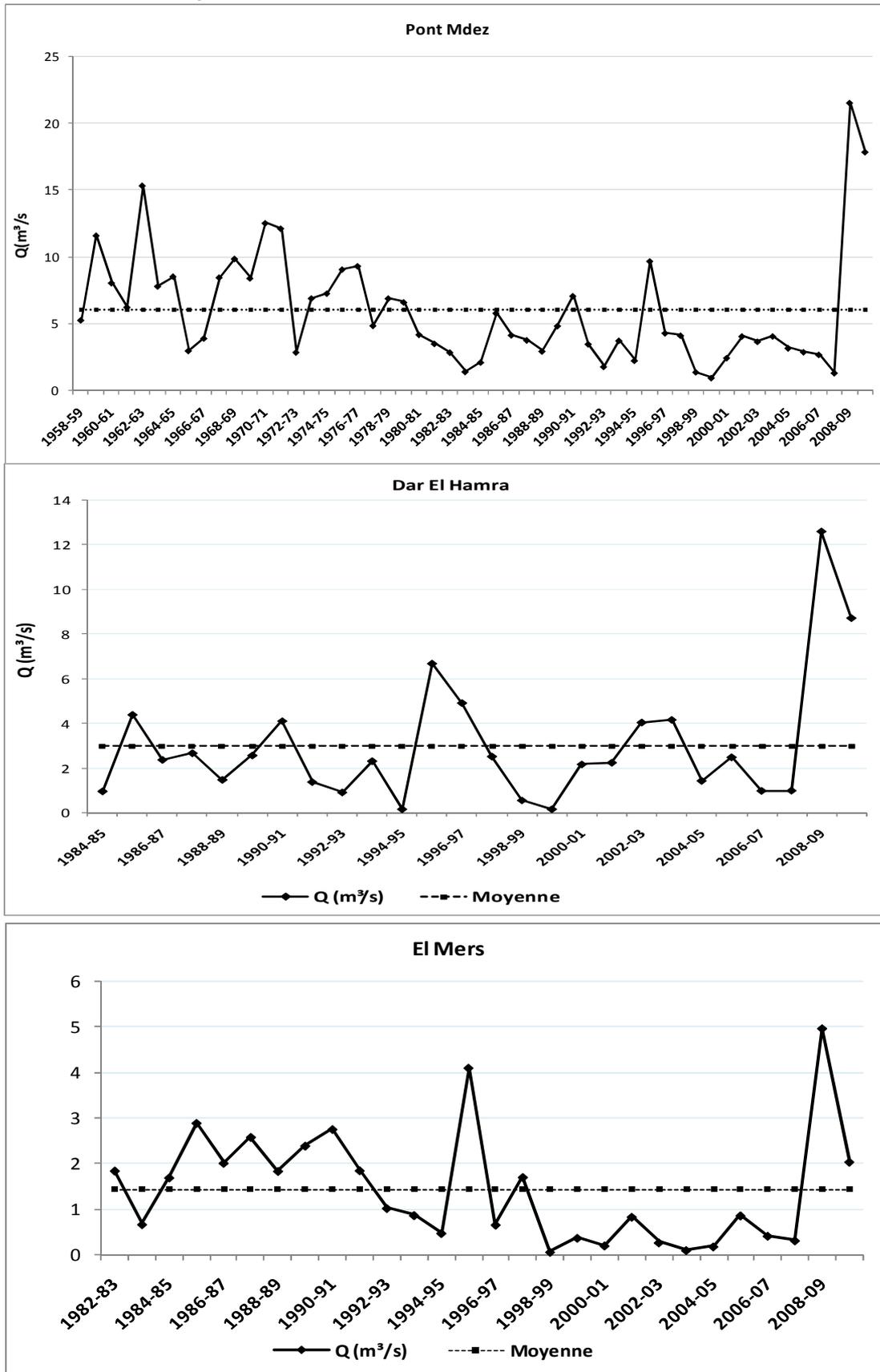


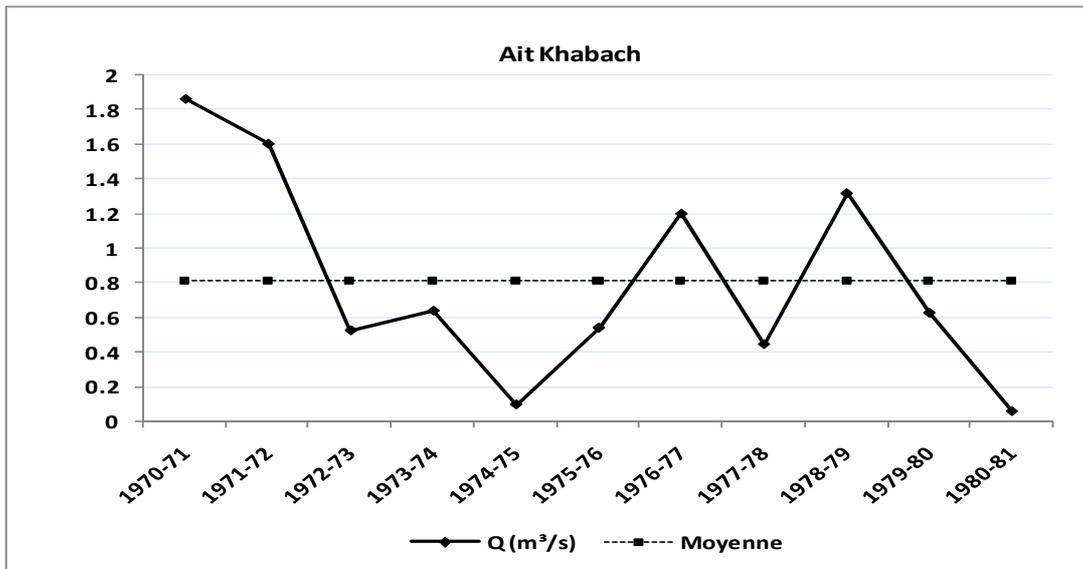




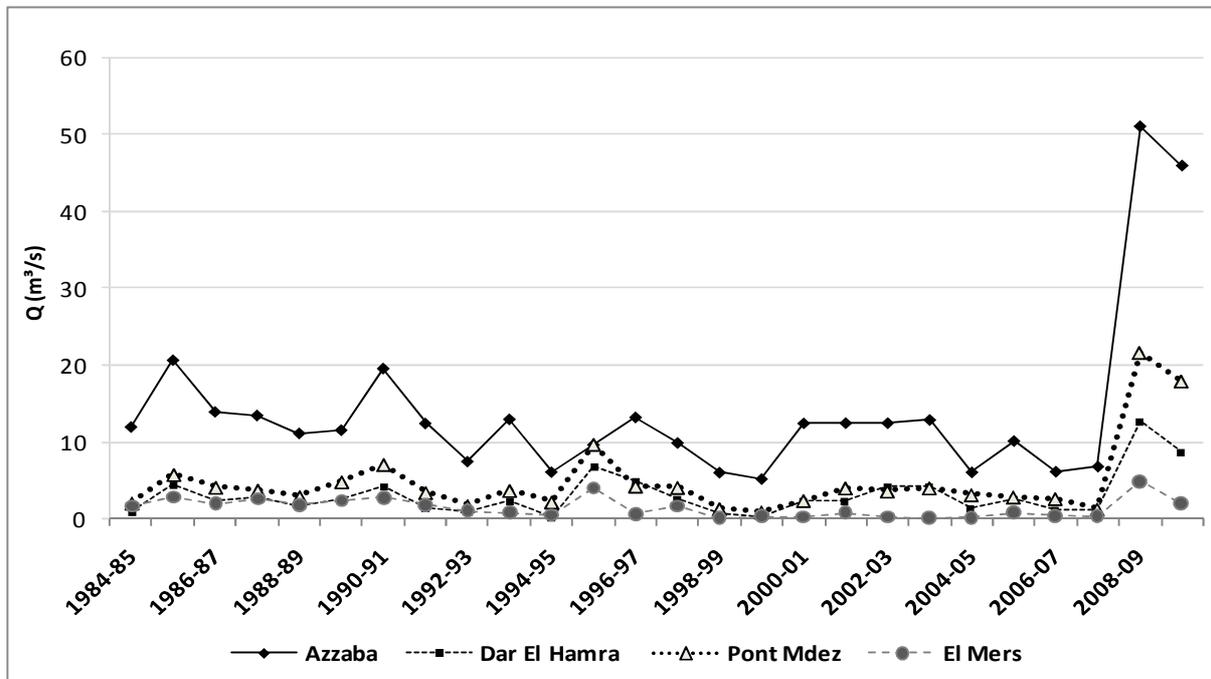
Chapitre 4

Annexe 4.1 : Débits moyens annuels et module

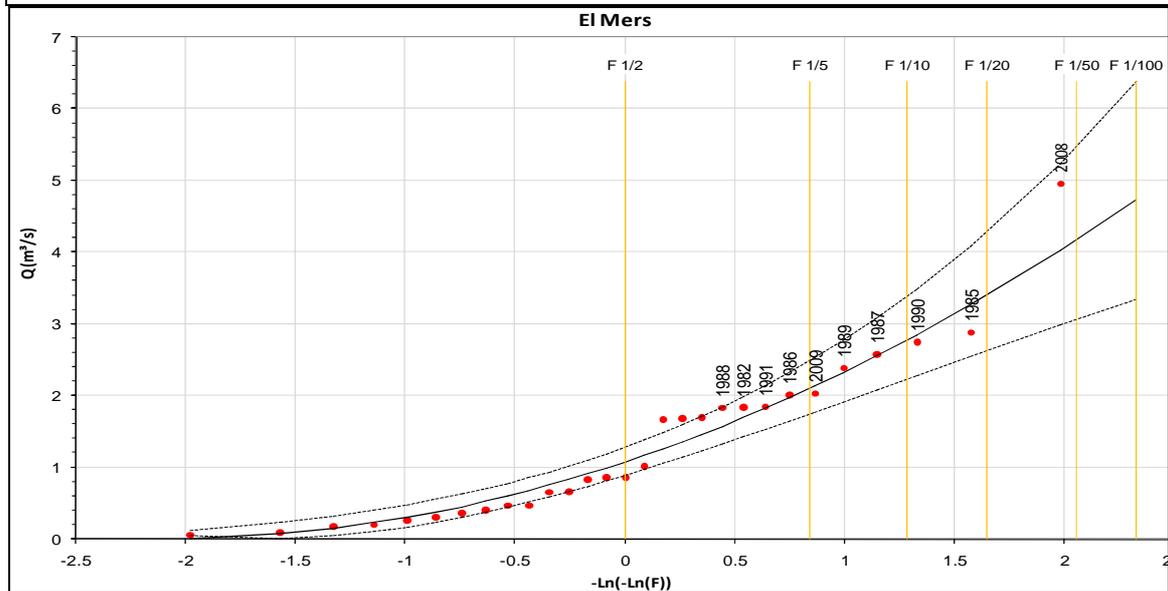
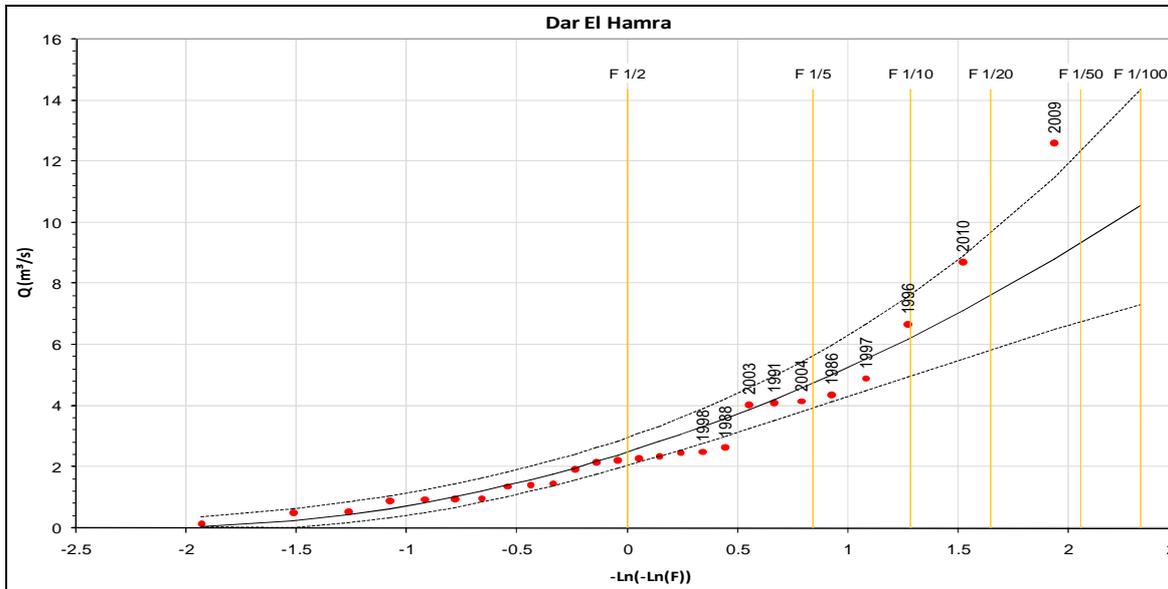
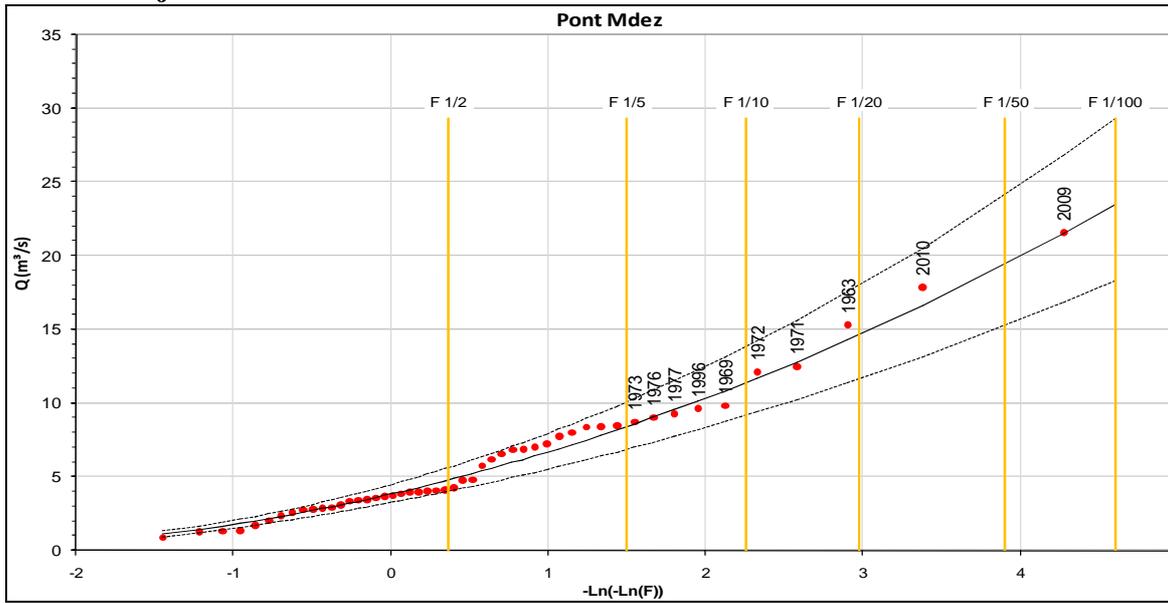




Annexe 4. 2 : Variabilité des débits du Haut Sebou 1984-1985/2009-2010

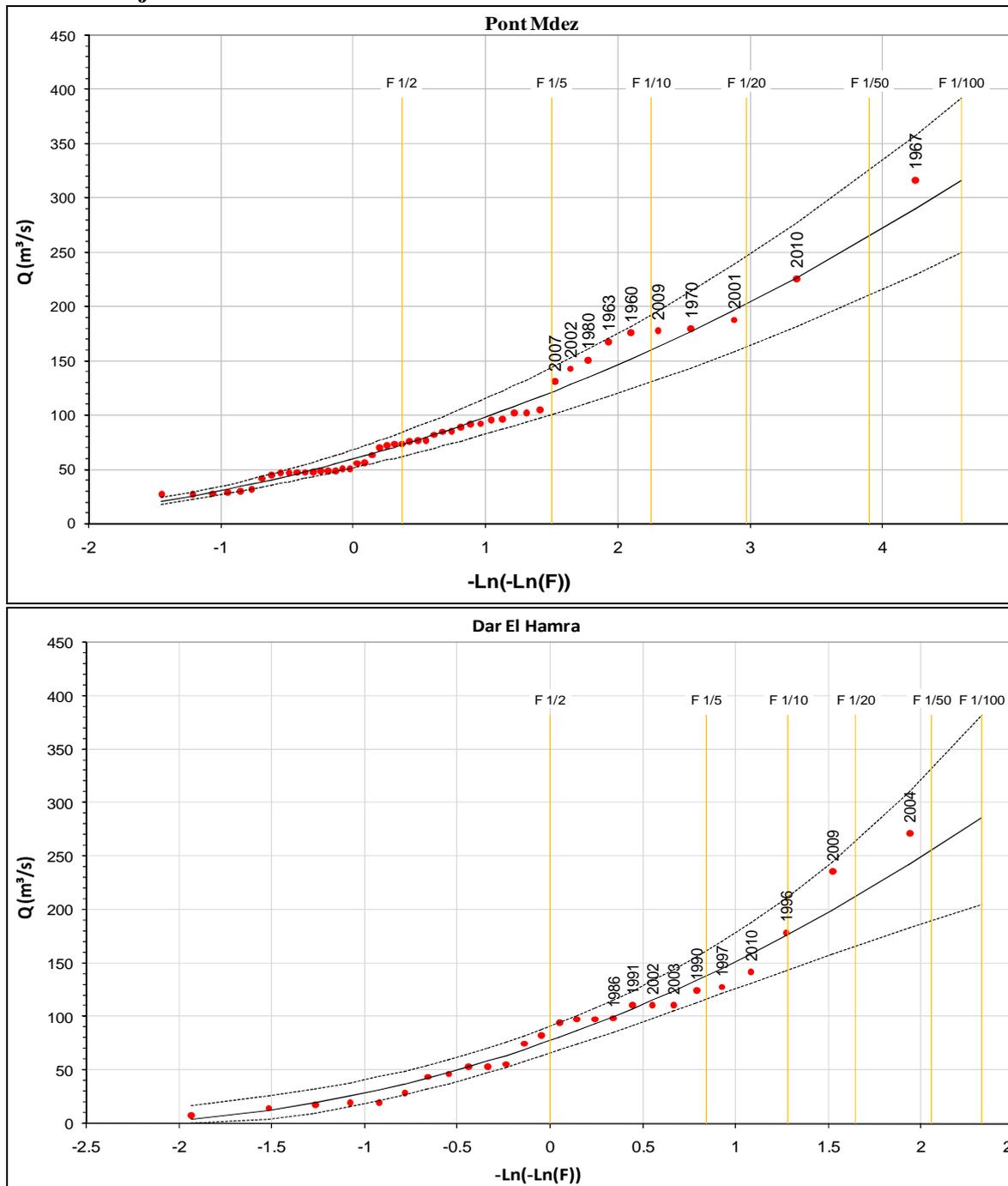


Annexe 4.3: Ajustement des modules

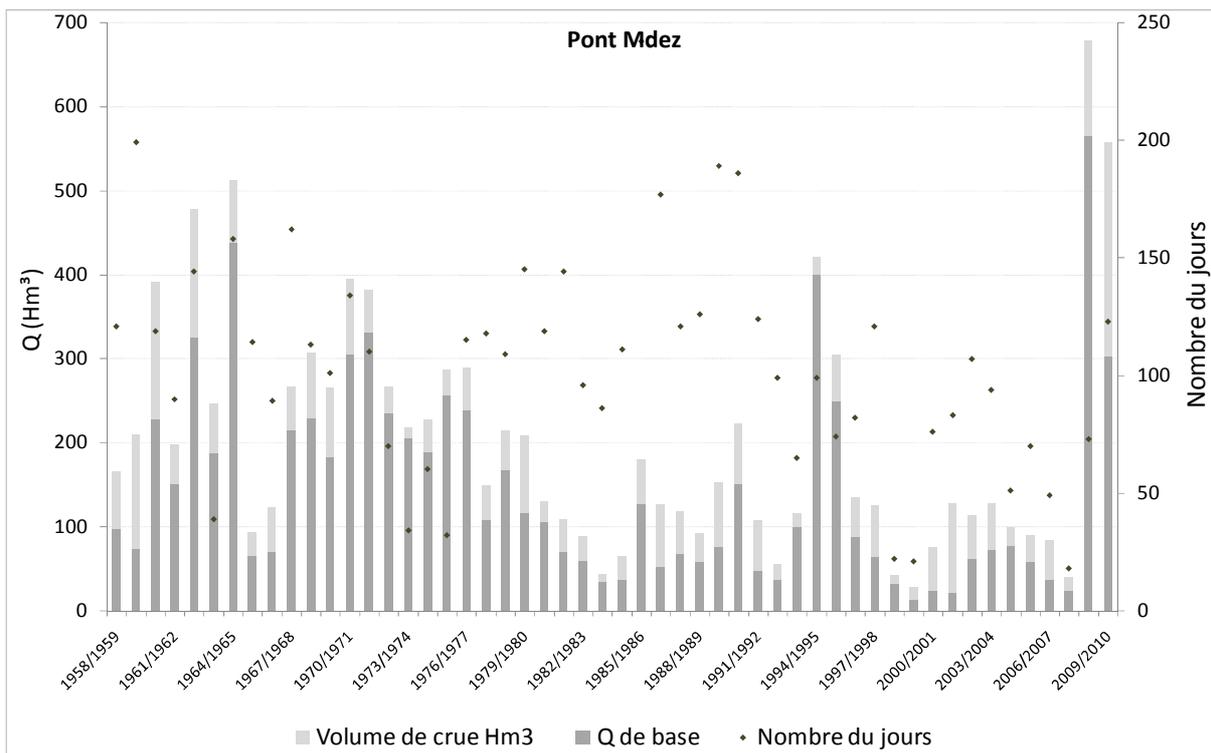
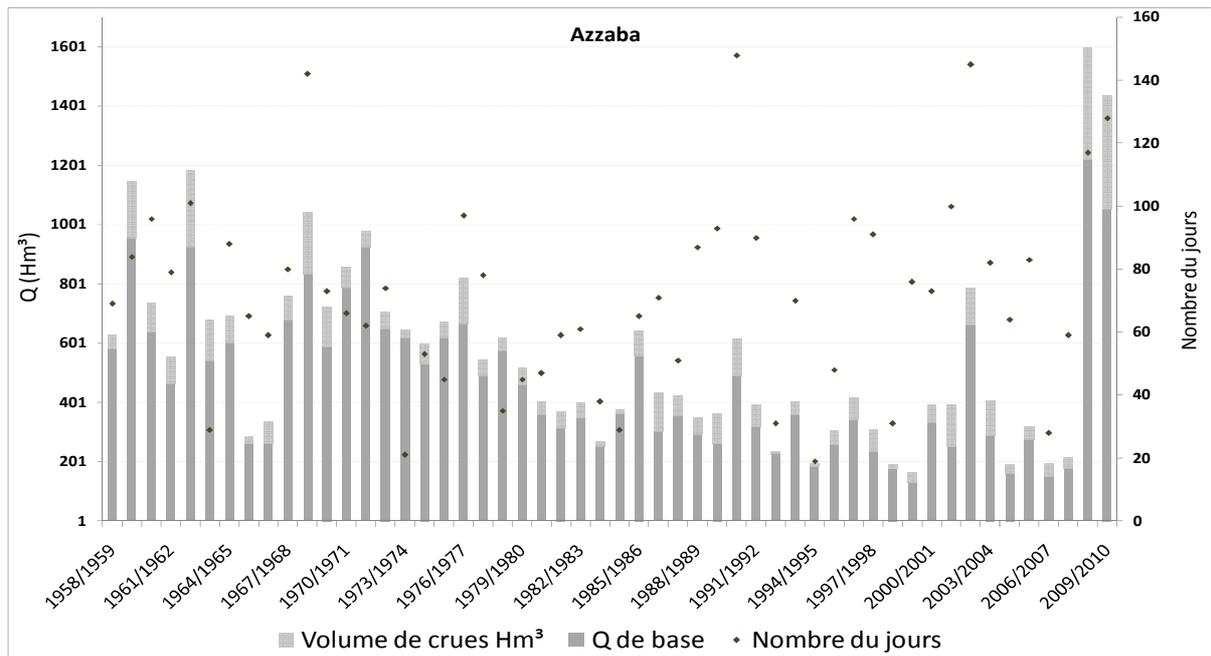


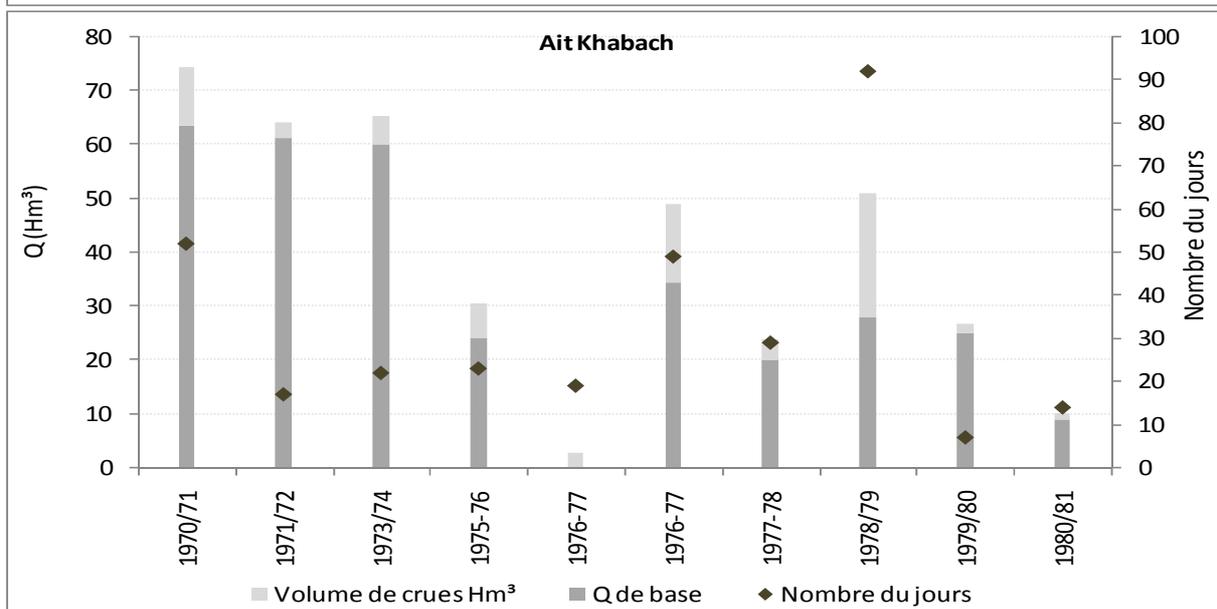
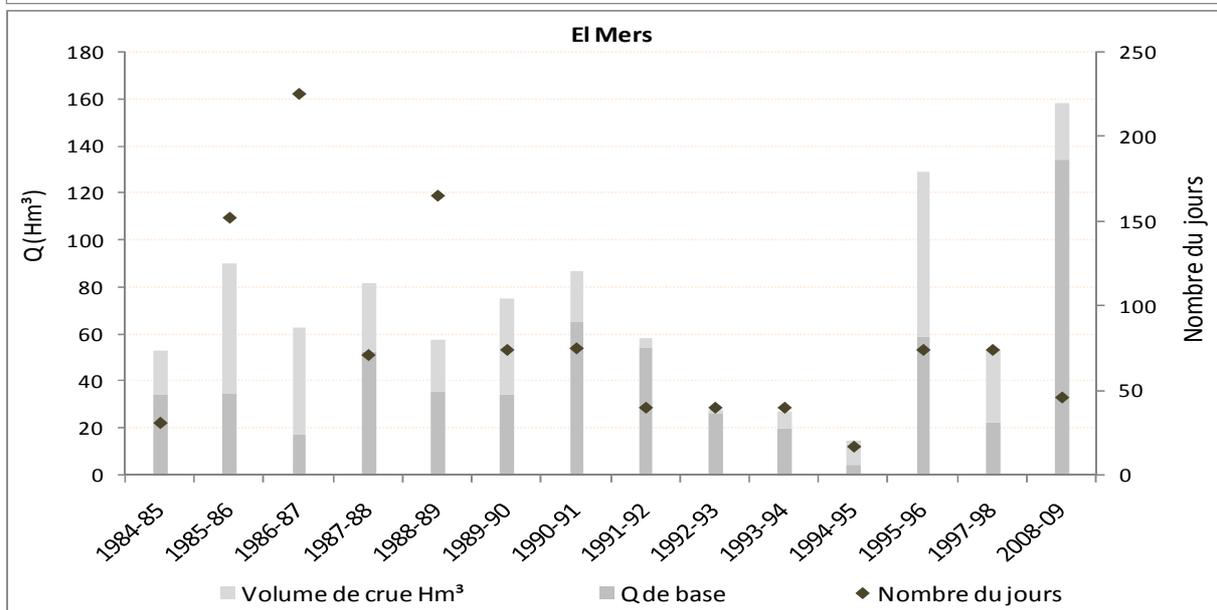
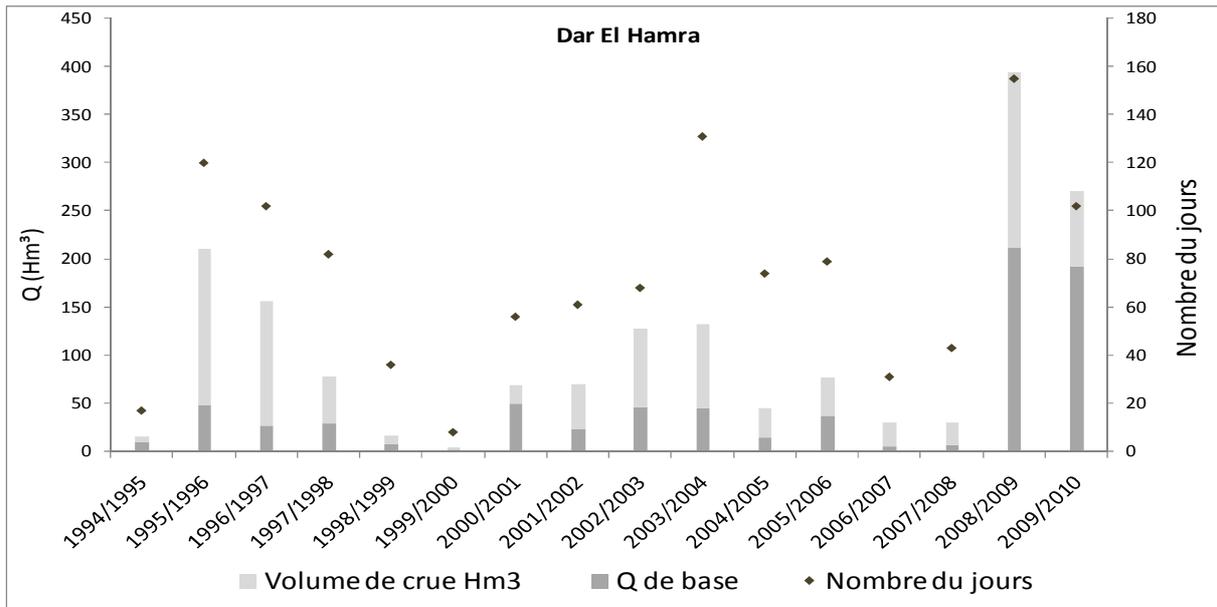
Chapitre 5

Annexe 5.1: Ajustement des débits de crues

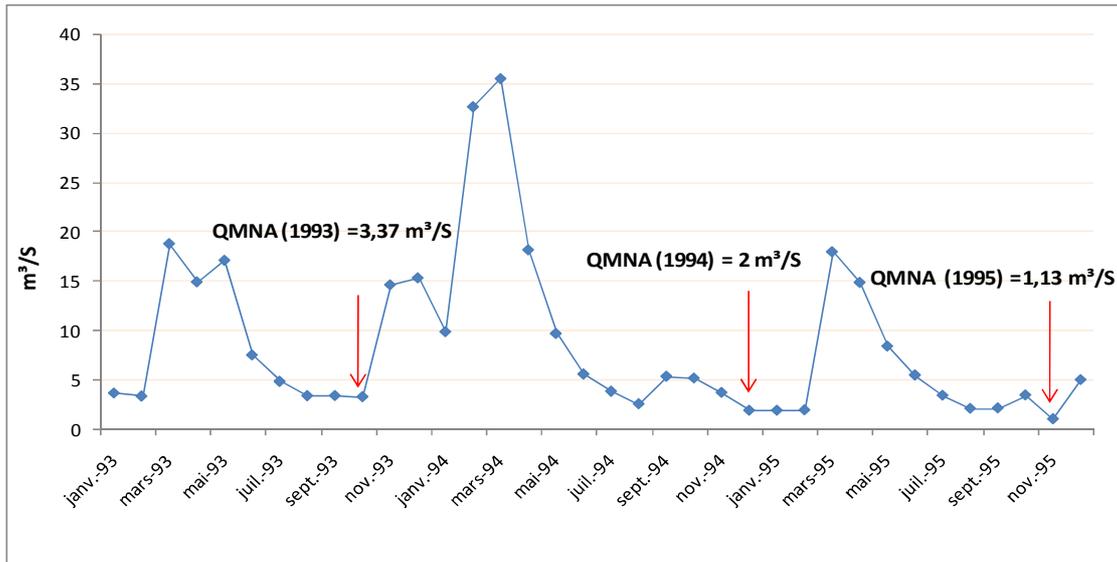


Annexe 5.2 : Caractéristiques de l'écoulement pour les épisodes de crue aux stations

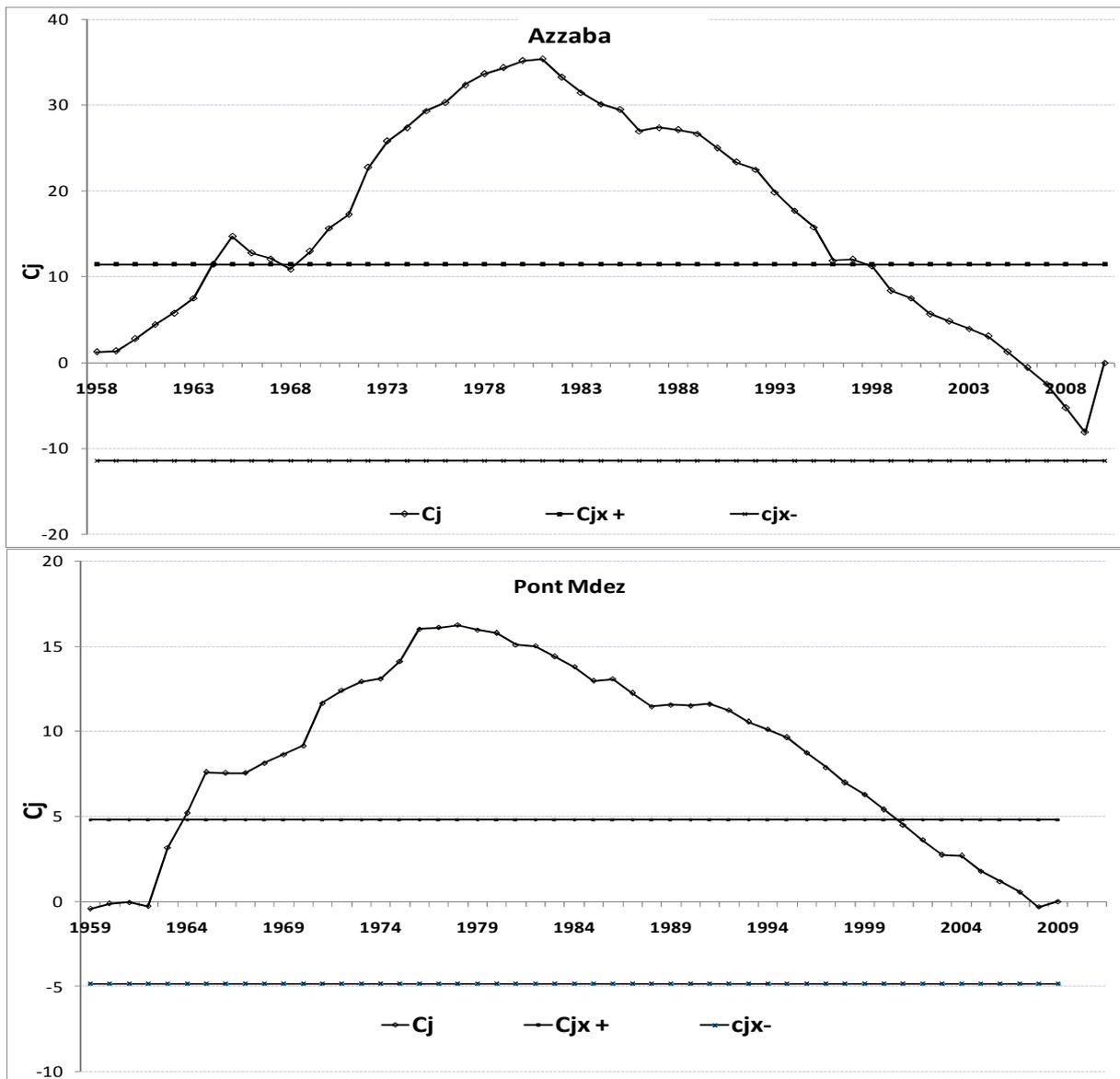




Annexe 5.3: Illustration de l'extraction des QMNA exemple ; Azzaba : 1993,1994 et 1995



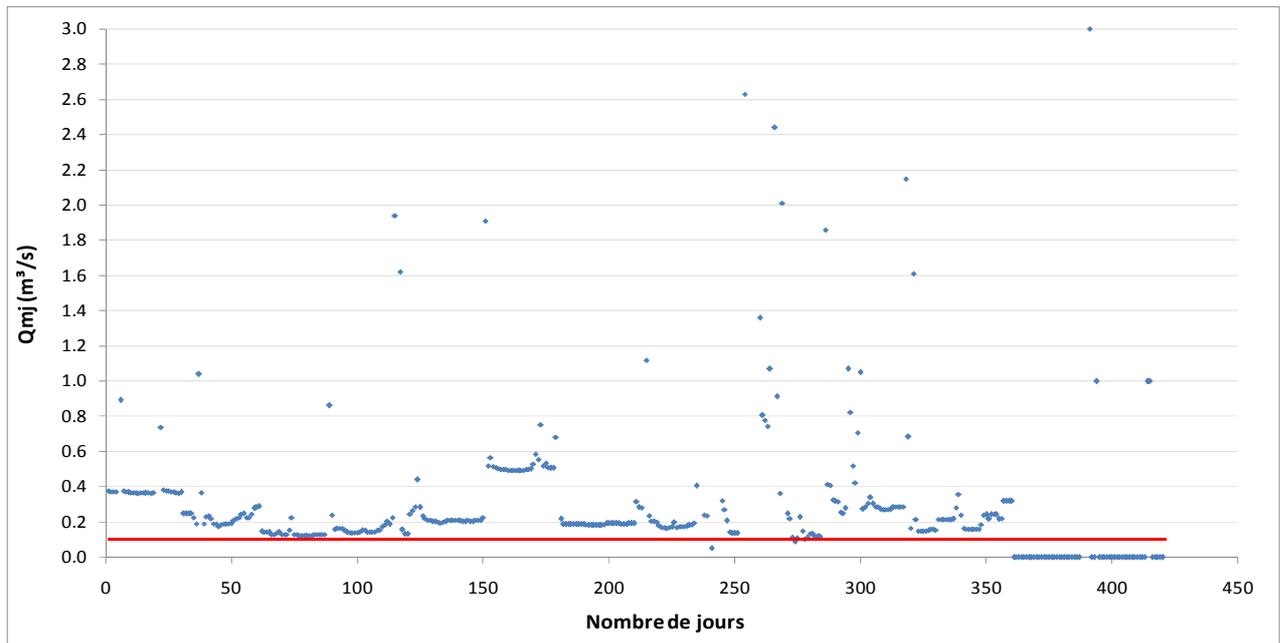
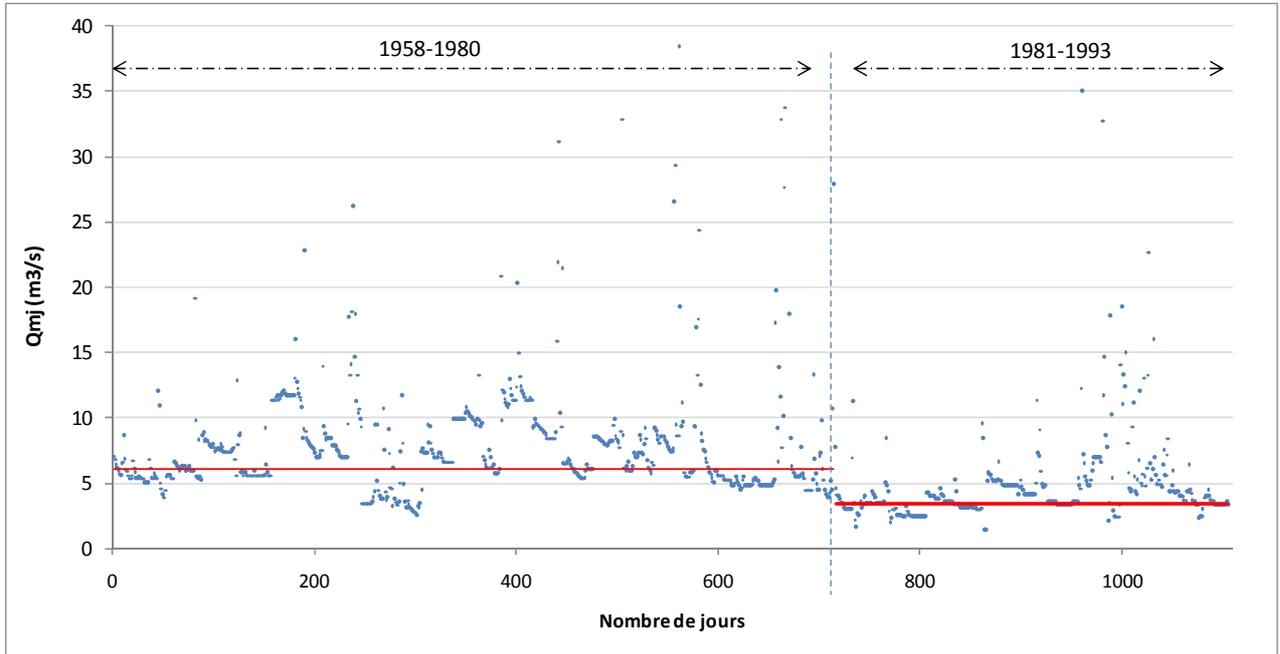
Annexe 5.4 : CUSUM des QMNA de Haut Sebou



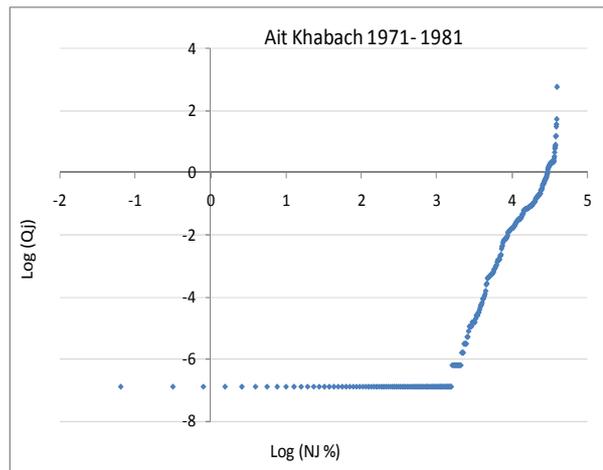
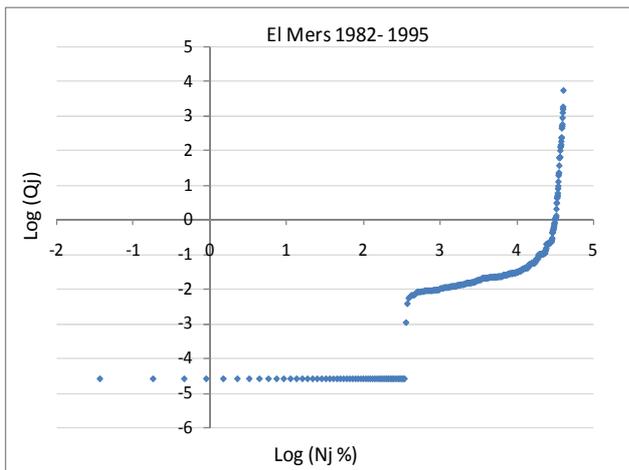
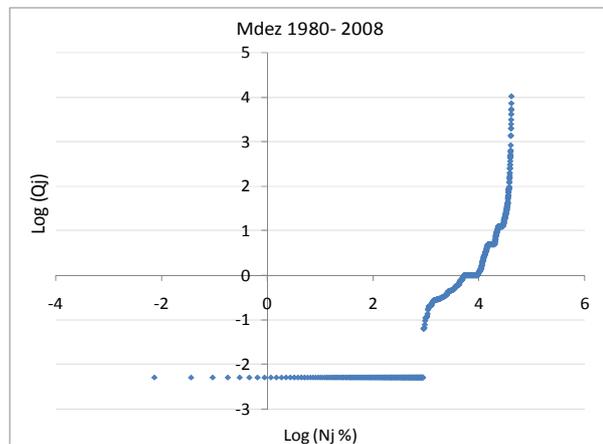
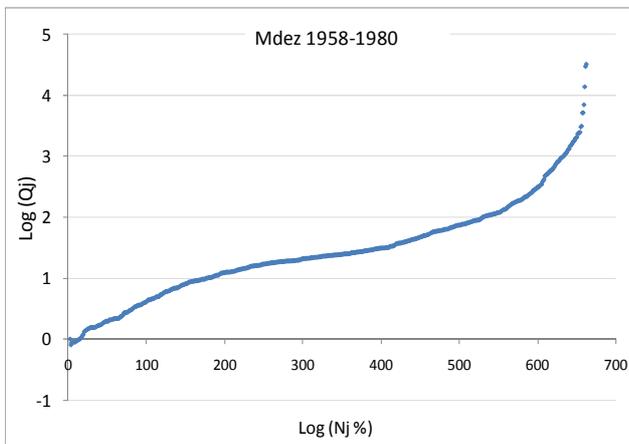
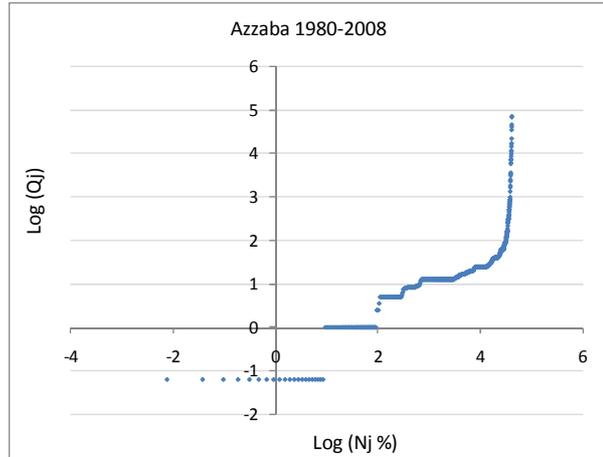
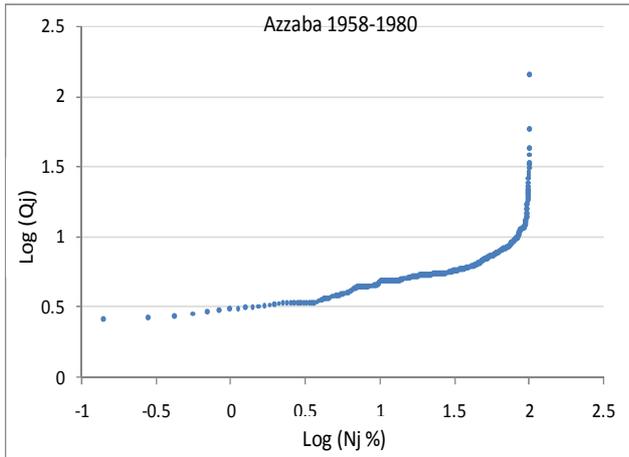
Annexe 5.5 : variations des rangs des années des étiages en fonction des différentes variables retenues (Azzaba).

Année	VCN3	Année	VCN 5	Année	VCN 7	Année	VCN10	Année	VCN30
1995	0,00	1995	0,00	1995	0,00	1995	0,00	1996	0,00
1996	0,00	1996	0,00	1996	0,00	1996	0,00	1995	1,13
1999	1,00	2007	1,00	2007	1,00	2007	1,30	2000	2,00
2007	1,00	2008	1,20	1985	1,45	1985	1,74	1994	2,00
2008	1,00	1993	1,40	1993	1,60	1993	1,86	2007	2,27
1993	1,26	1985	1,44	2008	1,86	1994	1,92	2005	2,47
1985	1,41	1994	1,92	1994	1,92	2000	2,00	1983	2,53
1994	1,92	2000	2,00	2000	2,00	2005	2,00	1985	2,90
2000	2,00	2005	2,00	2005	2,00	1990	2,25	1998	3,00
2005	2,00	1990	2,19	1990	2,23	1983	2,51	2004	3,00
1990	2,19	1966	2,35	1966	2,42	1966	2,68	2006	3,03
1967	2,21	1981	2,39	1983	2,51	1981	2,93	1993	3,05
1981	2,24	1983	2,51	1981	2,72	1967	2,98	1999	3,13
1982	2,46	1982	2,69	1982	2,80	1998	3,00	1984	3,36
1983	2,51	1967	2,80	1967	2,88	1999	3,00	1992	3,40
1968	2,71	1992	3,00	1998	3,00	2002	3,00	1988	3,50
1992	3,00	1998	3,00	1999	3,00	2004	3,00	1966	3,51
1997	3,00	1999	3,00	2002	3,00	2006	3,00	1981	3,56
1998	3,00	2002	3,00	2004	3,00	1992	3,06	1967	3,70
2002	3,00	2004	3,00	2006	3,00	1982	3,07	1990	3,72
2003	3,00	2006	3,00	1992	3,00	1989	3,18	1982	3,73
2004	3,00	1989	3,15	1989	3,15	1984	3,21	1989	3,87
2006	3,00	1984	3,20	1984	3,20	1988	3,39	2003	3,90
1989	3,15	1988	3,39	1988	3,39	1997	3,70	1997	4,00
1984	3,20	1997	3,40	1997	3,57	2003	3,70	2002	4,07
1988	3,39	2003	3,40	2003	3,57	2008	3,80	1987	4,31
2001	3,67	1987	4,17	1987	4,22	1987	4,22	2008	4,33
1987	3,96	2001	4,20	1991	4,24	1991	4,24	1991	4,88
1958	4,04	1980	4,21	1980	4,40	1986	4,59	1986	4,91
1980	4,08	1958	4,24	1958	4,55	1980	4,62	1978	4,96
1991	4,24	1991	4,24	2001	4,57	2001	4,80	1980	5,29
1986	4,59	1986	4,59	1986	4,59	1978	4,84	1958	5,49
1978	4,62	1978	4,77	1978	4,81	1958	4,89	1961	5,76
1975	4,99	1975	5,06	1975	5,14	1977	5,18	1975	5,78
1977	5,14	1977	5,14	1977	5,14	1975	5,25	1962	5,80
1979	5,22	1979	5,22	1979	5,28	1979	5,40	2001	5,83
1962	5,23	1961	5,34	1961	5,41	1961	5,43	1957	5,97
1957	5,40	1957	5,43	1957	5,42	1957	5,48	1973	6,00
1959	5,42	1973	5,43	1973	5,48	1973	5,59	1970	6,05
1960	5,42	1970	5,53	1970	5,58	1962	5,61	1968	6,20
1971	5,47	1962	5,60	1962	5,60	1970	5,66	1979	6,25
1963	5,60	1968	5,98	1968	6,07	1959	6,12	1974	6,29
1976	5,86	1959	6,03	1976	6,09	1968	6,13	1977	6,46
1969	5,93	1976	6,04	1959	6,12	1976	6,18	1959	6,48
1974	6,14	1974	6,17	1974	6,19	1974	6,19	1976	7,14
1966	7,02	1965	7,02	1965	7,02	1965	7,11	1960	7,70
1965	7,05	1964	7,09	1964	7,19	1964	7,32	1971	7,84
1961	7,43	1960	7,43	1960	7,43	1960	7,45	1964	8,00
1973	8,43	1972	8,43	1972	8,43	1972	8,46	1965	8,78
1970	9,38	1969	9,38	1969	9,38	1969	9,40	1972	9,04
1972	10,30	1963	10,30	1963	10,30	1963	10,30	1969	9,96
1964	10,30	1971	10,44	1971	10,53	1971	10,61	1963	10,53
2009	12,00	2009	12,00	2009	12,00	2009	12,00	2009	12,20
2010	19,00	2010	19,40	2010	19,57	2010	19,80	2010	21,67

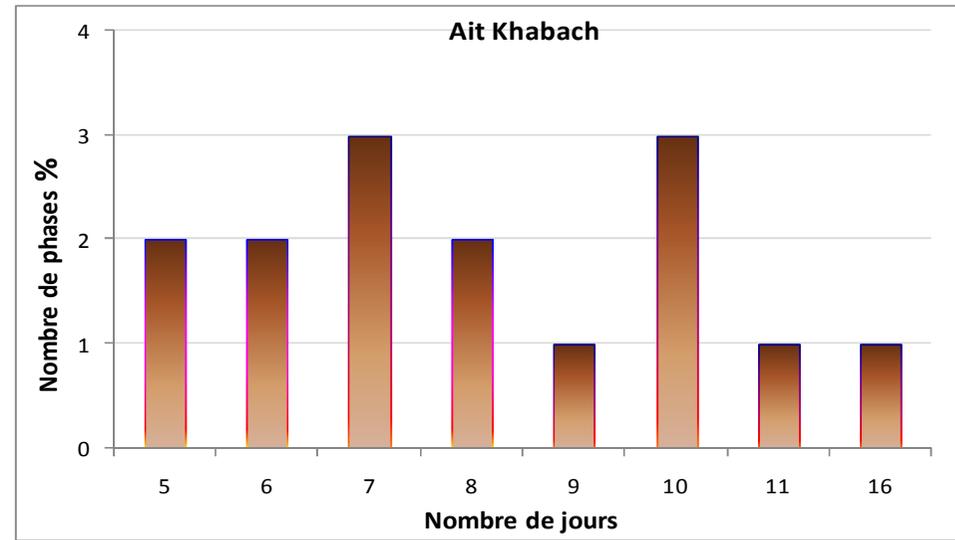
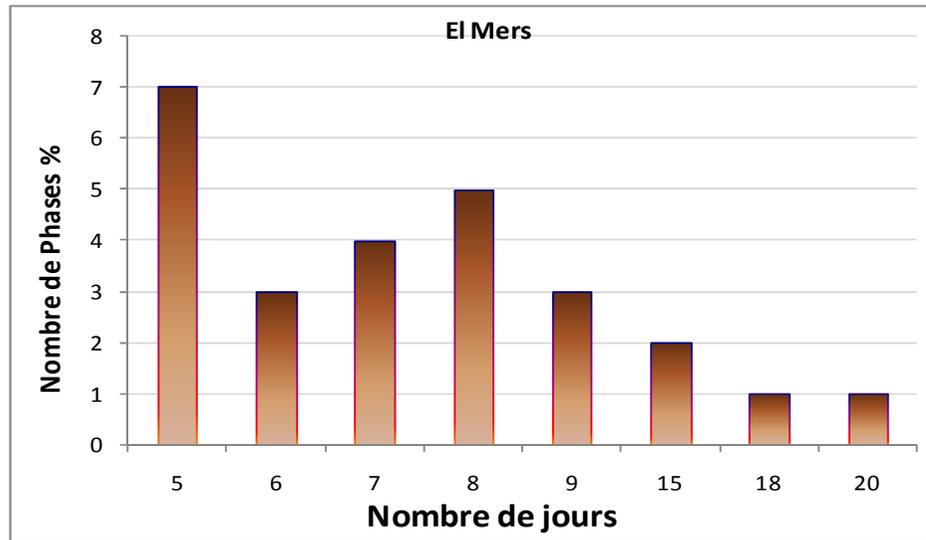
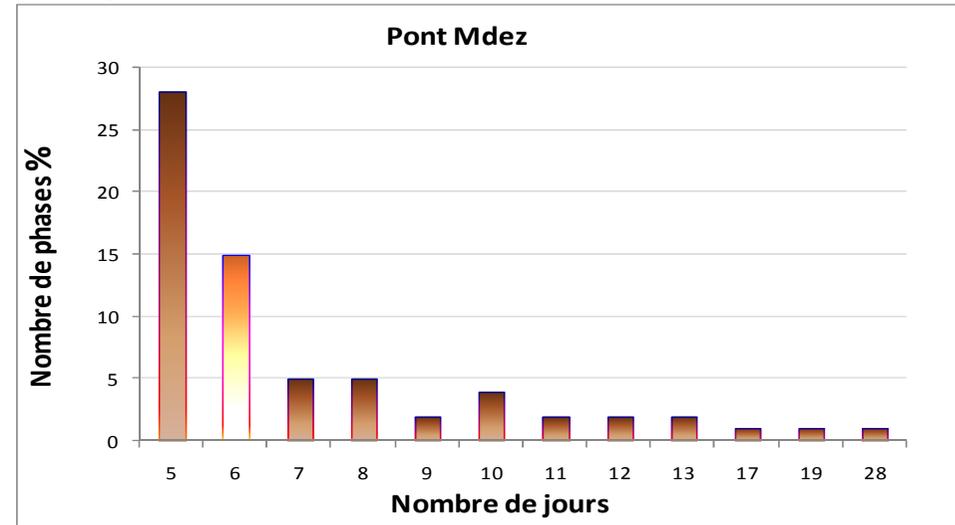
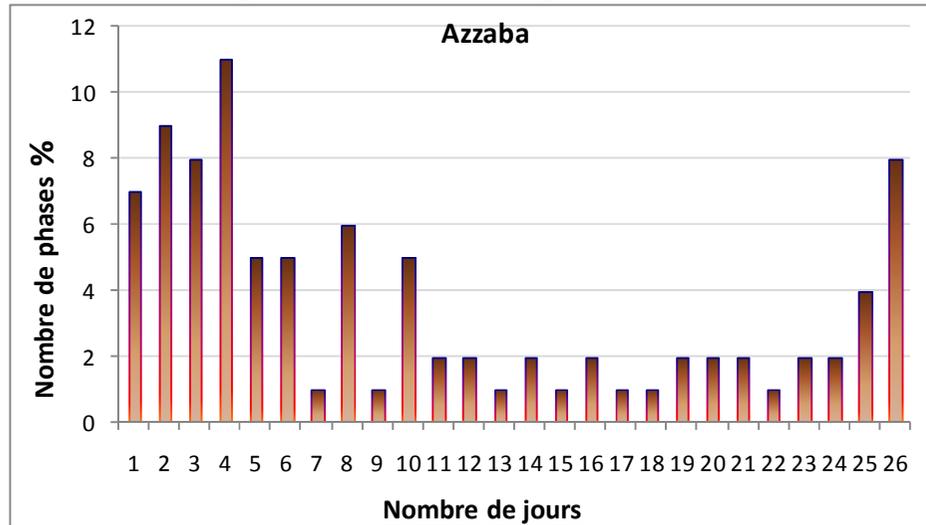
Annexe 5.6 : Hydrogramme composé des mois de septembre à la station d’Azzaba et d’El Mers et débit modal selon Fréchet (pour la station d’El Mers les valeurs supérieur à 3 ne sont pas représentées)



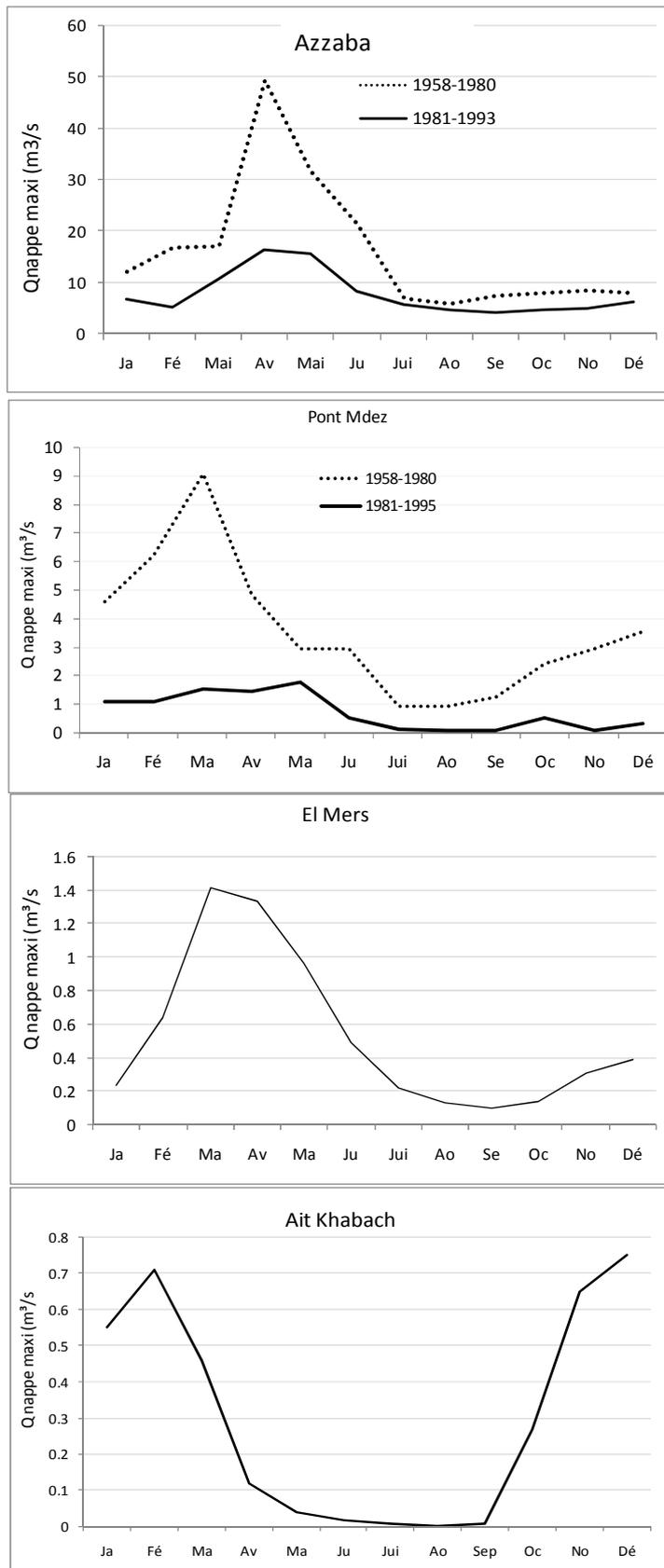
Annexe 5.7 : Courbes des logarithmes des débits classés pour les mois des septembres



Annexe 5.8 : Histogrammes du nombre de phases de tarissement selon le nombre de jours

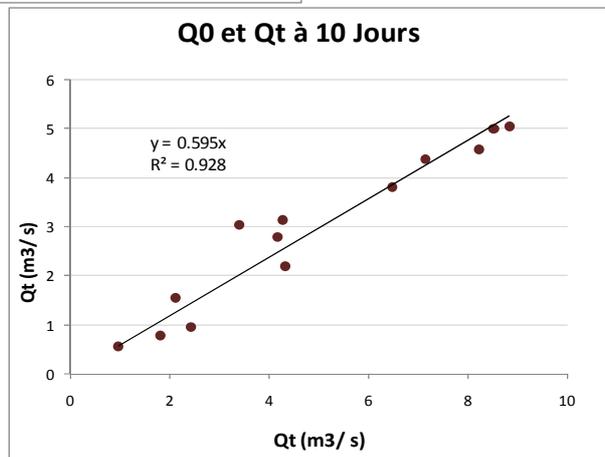
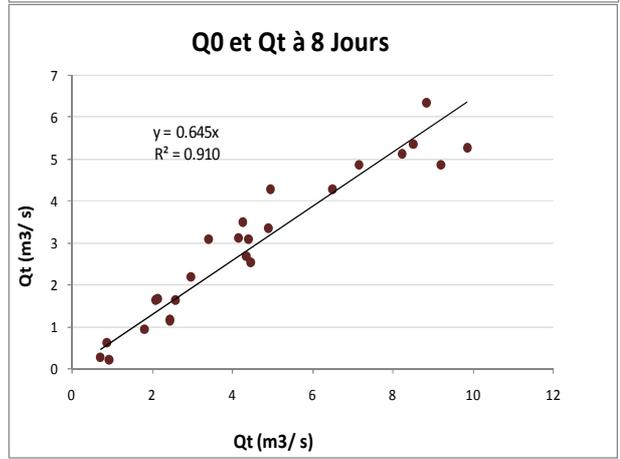
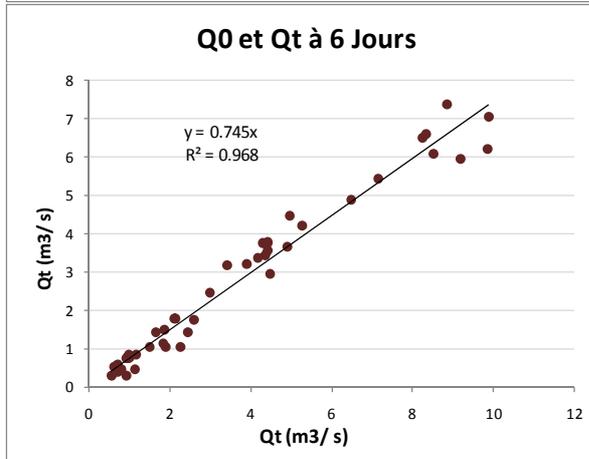
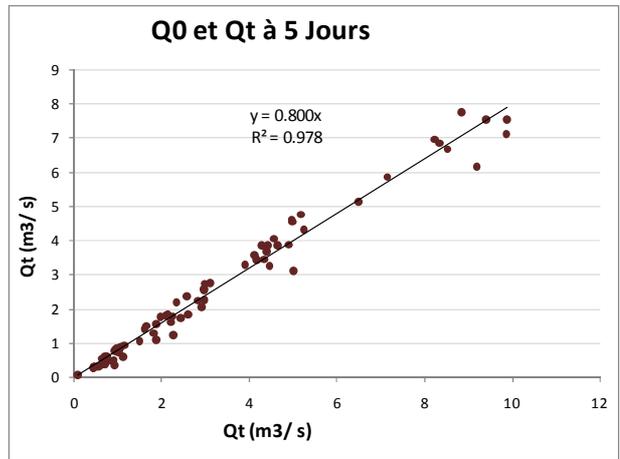
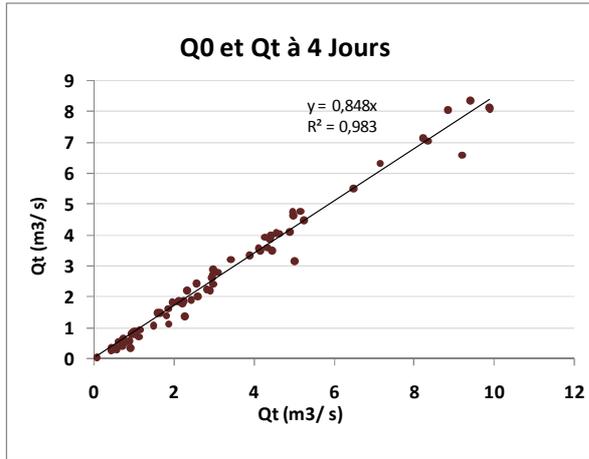


Annexe 5.9: Valeurs du mode Fréchet

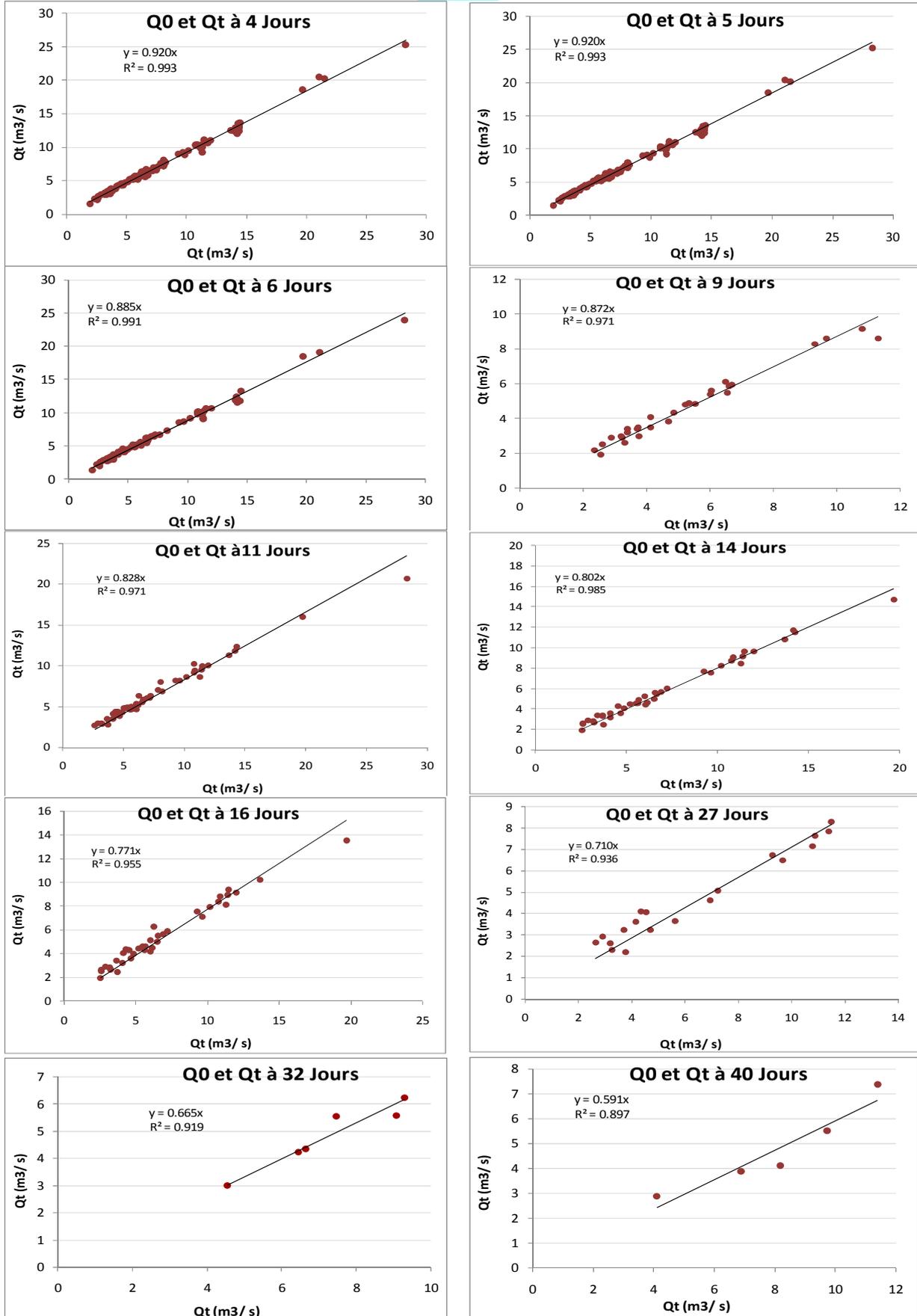


Annexe 5.10 : Courbes par la méthode des pentes

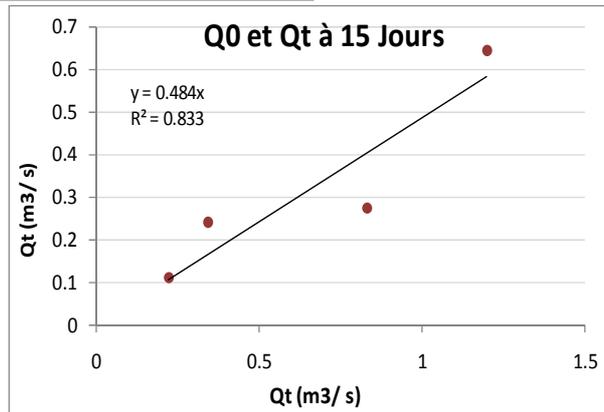
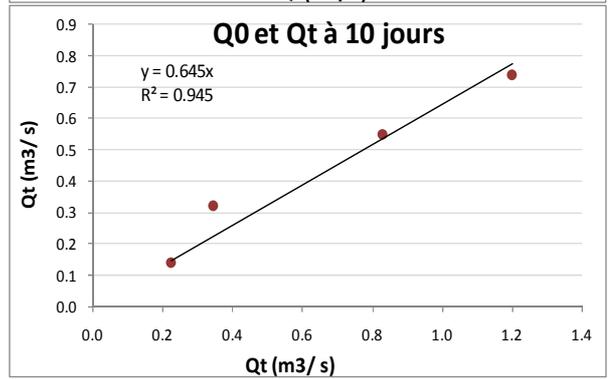
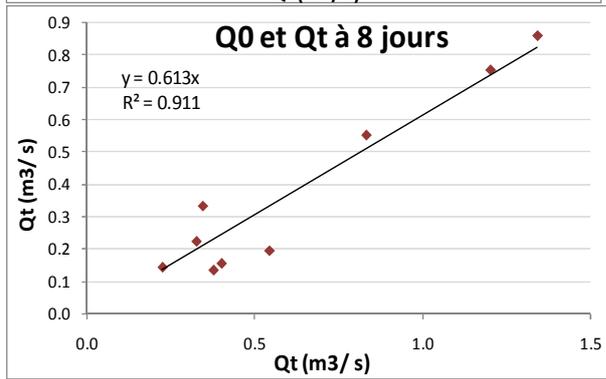
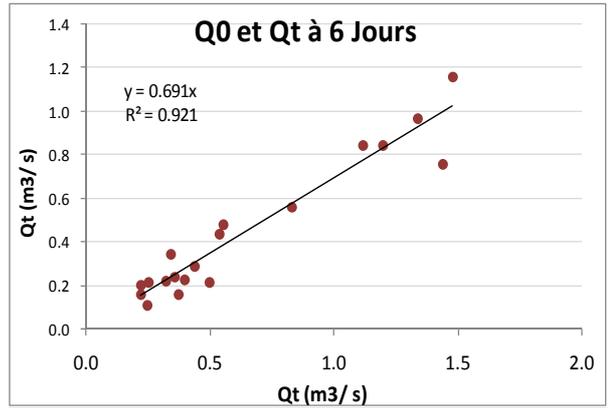
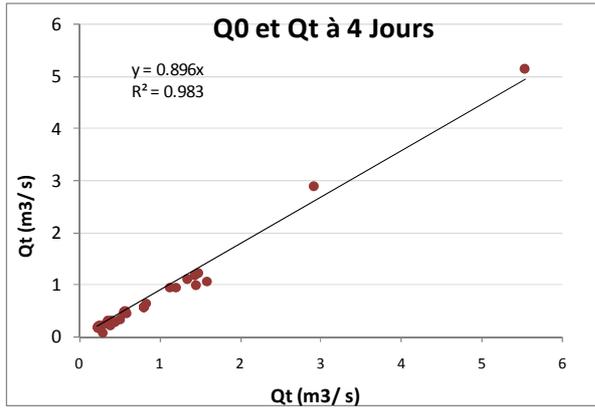
Pont Mdez



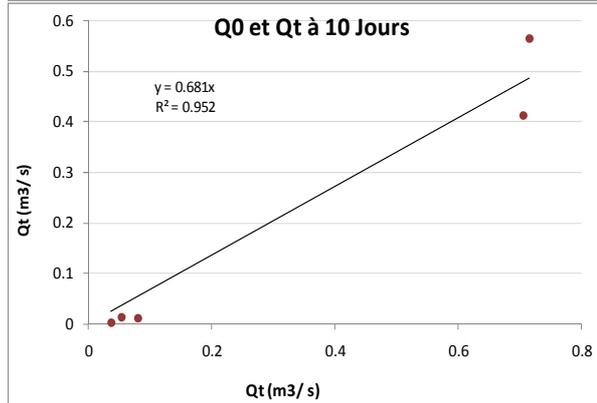
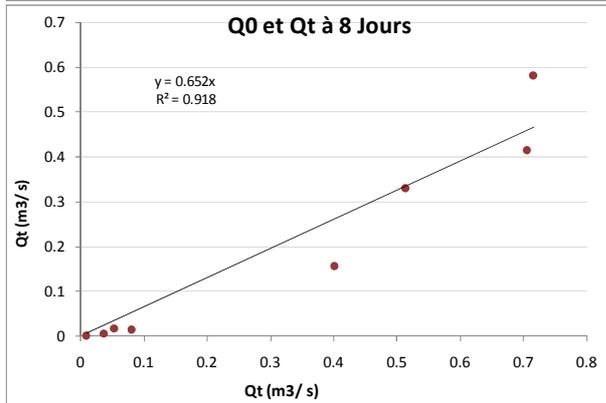
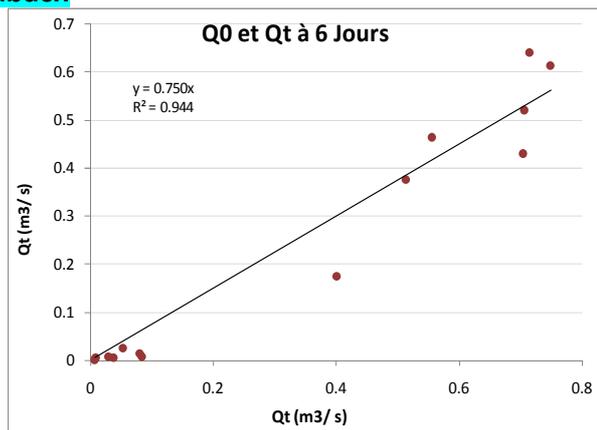
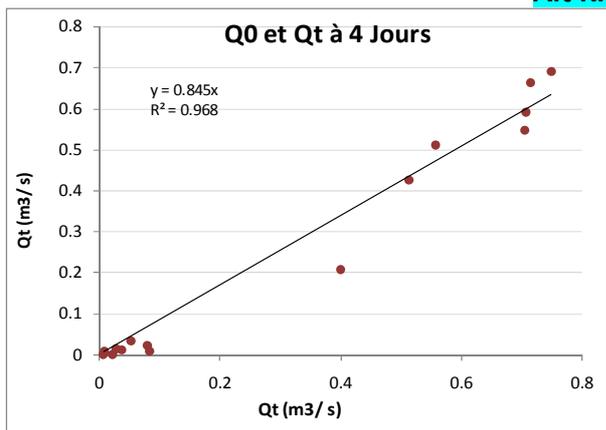
AZZABA



El Mers



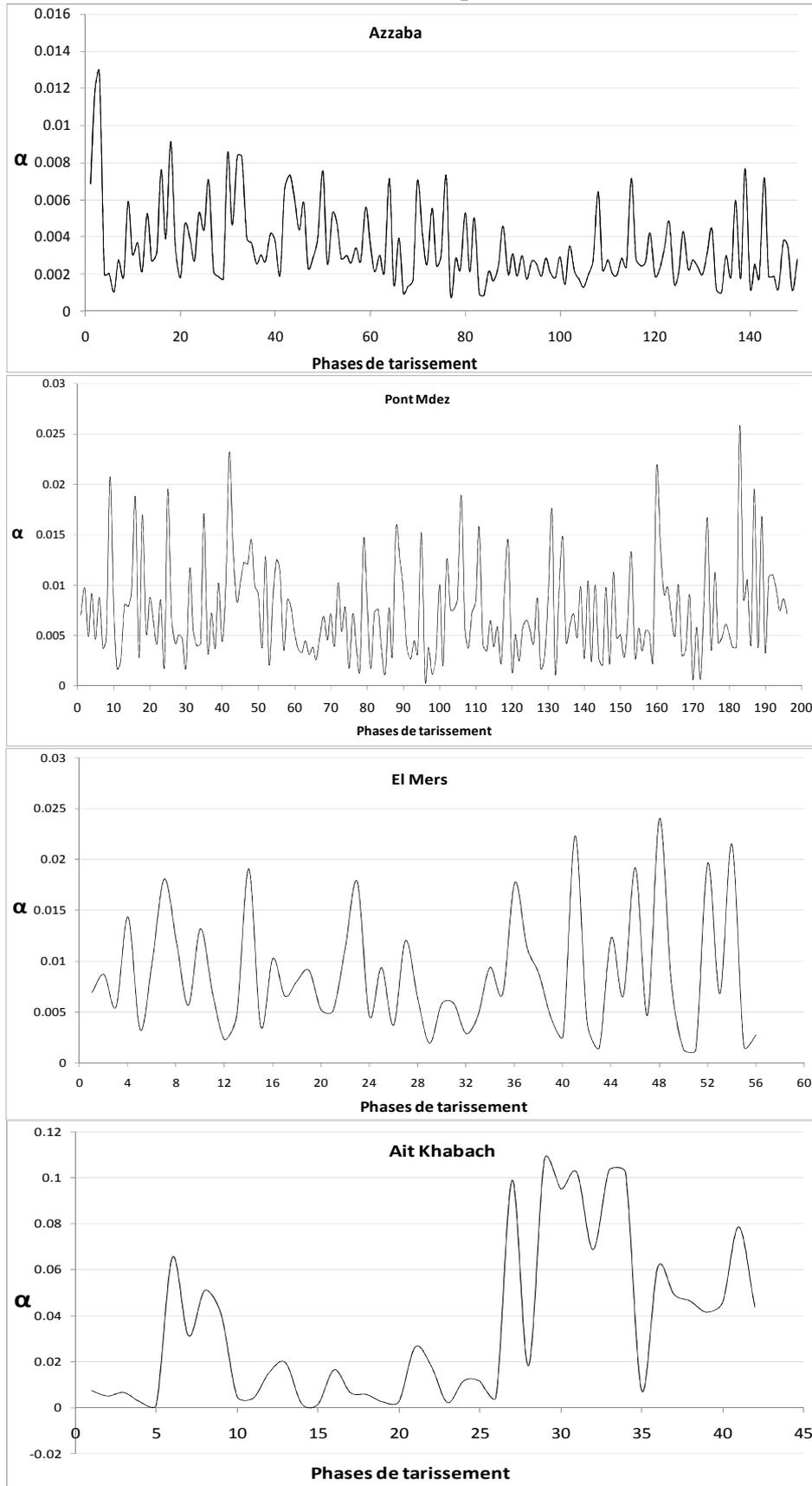
Aït Khabach



Annexe 5.11 : Statistiques descriptives des phases de tarissement pour les stations étudiées

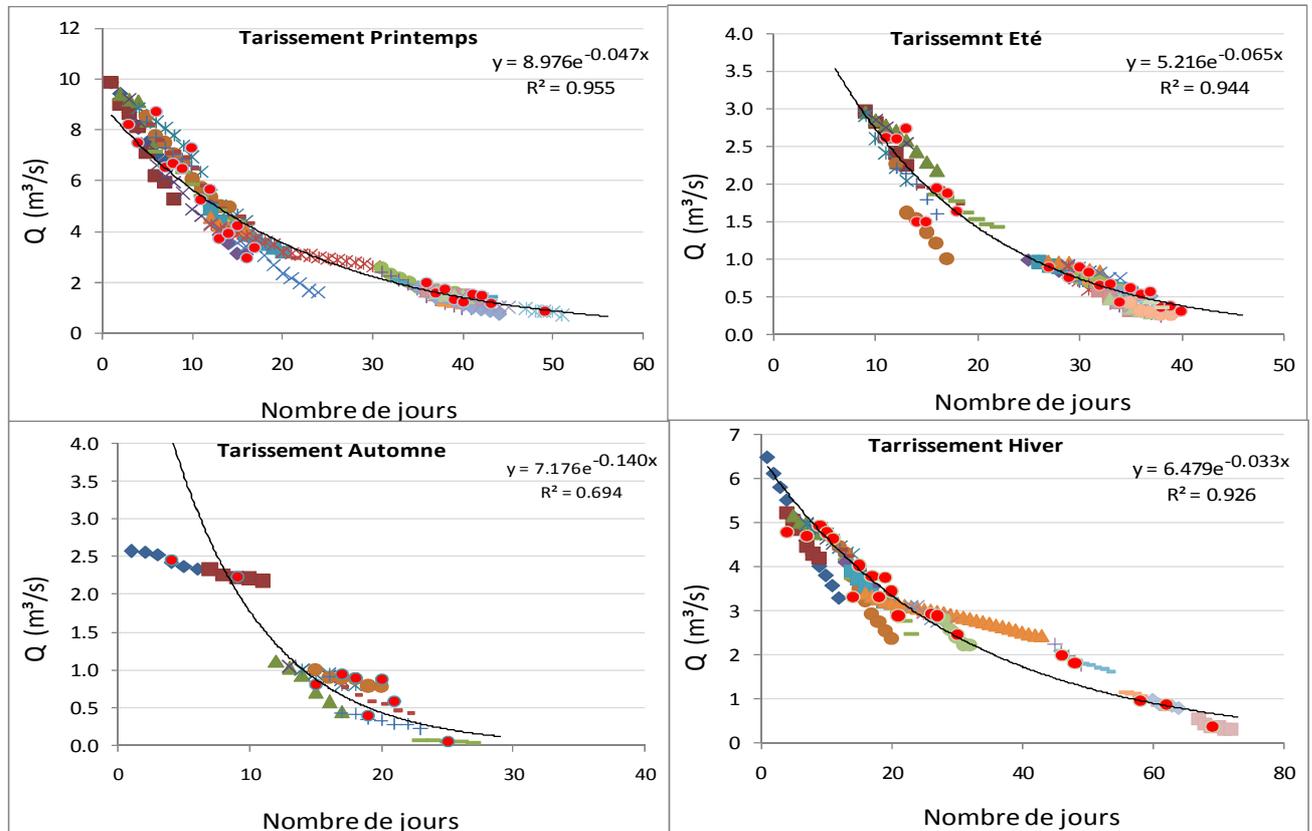
Stations	Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	d
Azzaba	Nombre de phases	5	1	0	2	3	18	28	15	11	8	2	5
	Moyenne	-0,009	0,004	\	0,022	0,013	0,015	0,017	0,013	0,010	0,019	0,010	0,008
	Coef. var	83 %	\	\	20 %	7 %	36 %	39 %	55 %	87 %	80 %	71 %	49 %
Mdez	Nombre de phases	13	6	4	12	7	10	10	4	4	0	5	1
	Moyenne	-0.038	-0.038	-0.048	-0.060	-0.056	-0.052	-0.067	-0.091	-0.078	\	-0.068	-0.012
	Coef. var	63%	38%	53%	34%	50%	62%	53%	28%	65%	\	99%	\
El Mers	Nombre de phases	4	4	4	5	3	4	0	1	0	2	1	0
	Moyenne	-0.078	-0.027	\	-0.046	-0.066	-0.054	\	-0.232	\	-0.094	-0.019	\
	Coef. var	75%	\	\	37%	48%	88%	\	\	\	52%	\	\
Ait. Kh	Nombre de phases	2	2	0	1	3	2	2	0	0	0	1	2
	Moyenne	-0.022	-0.009	\	-0.414	-0.196	-0.300	-0.124	\	\	\	-0.071	-0.071
	Coef. var	46%	\	\	\	59%	23%	86%	\	\	\	\	86%

Annexe 5.12 : Variation d'alpha de tarissement

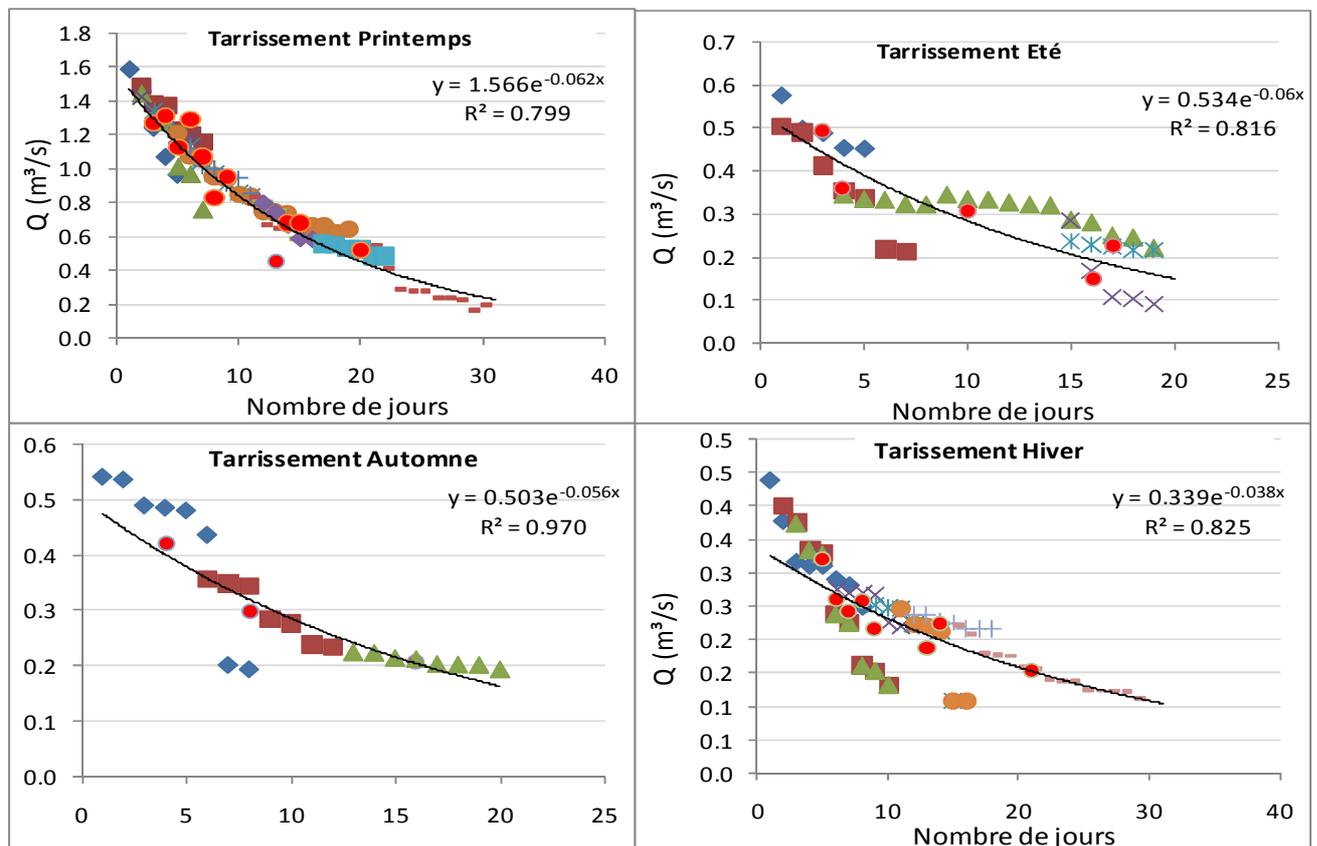


Annexe 5.13 : Phases de tarissement obtenues à partir d'un ajustement graphique (Vidange « successive » des nappes)

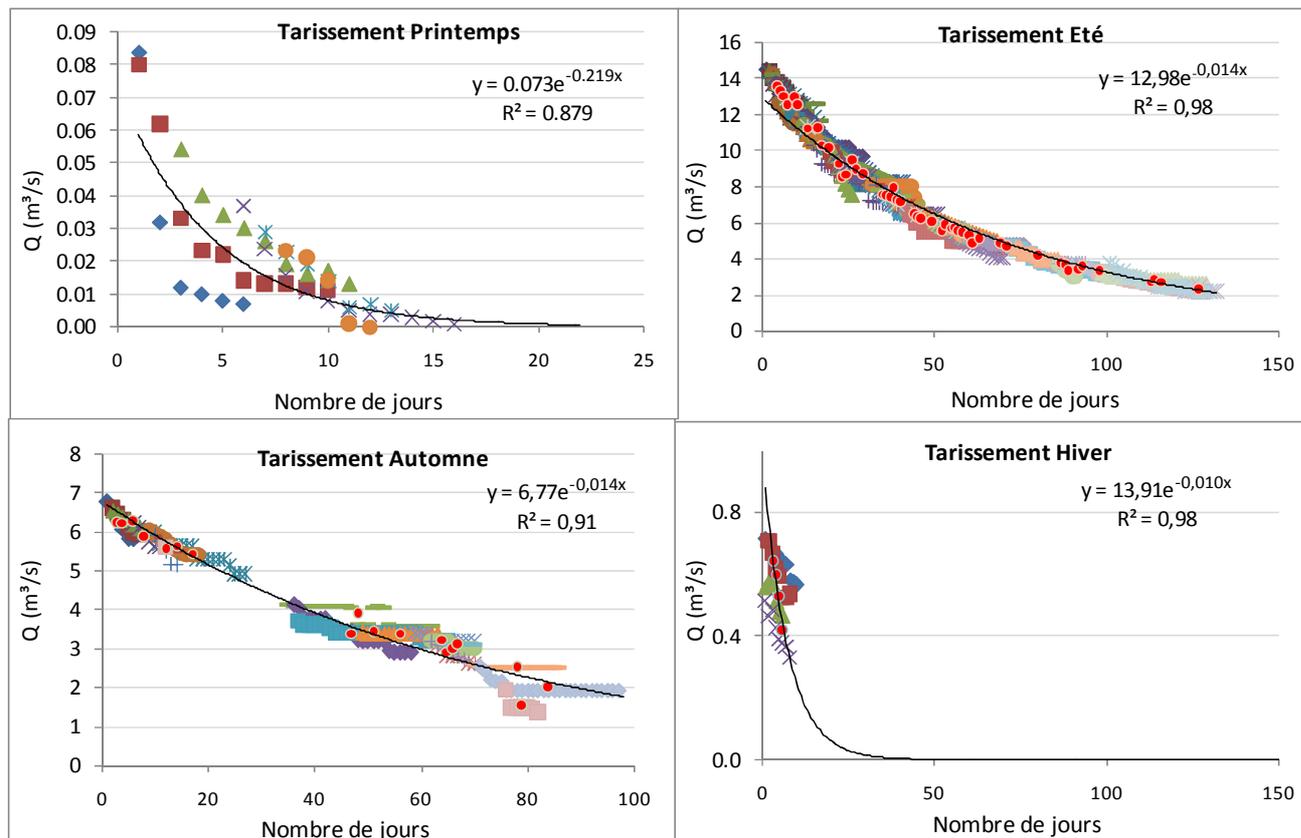
Pont Mdez



El Mers

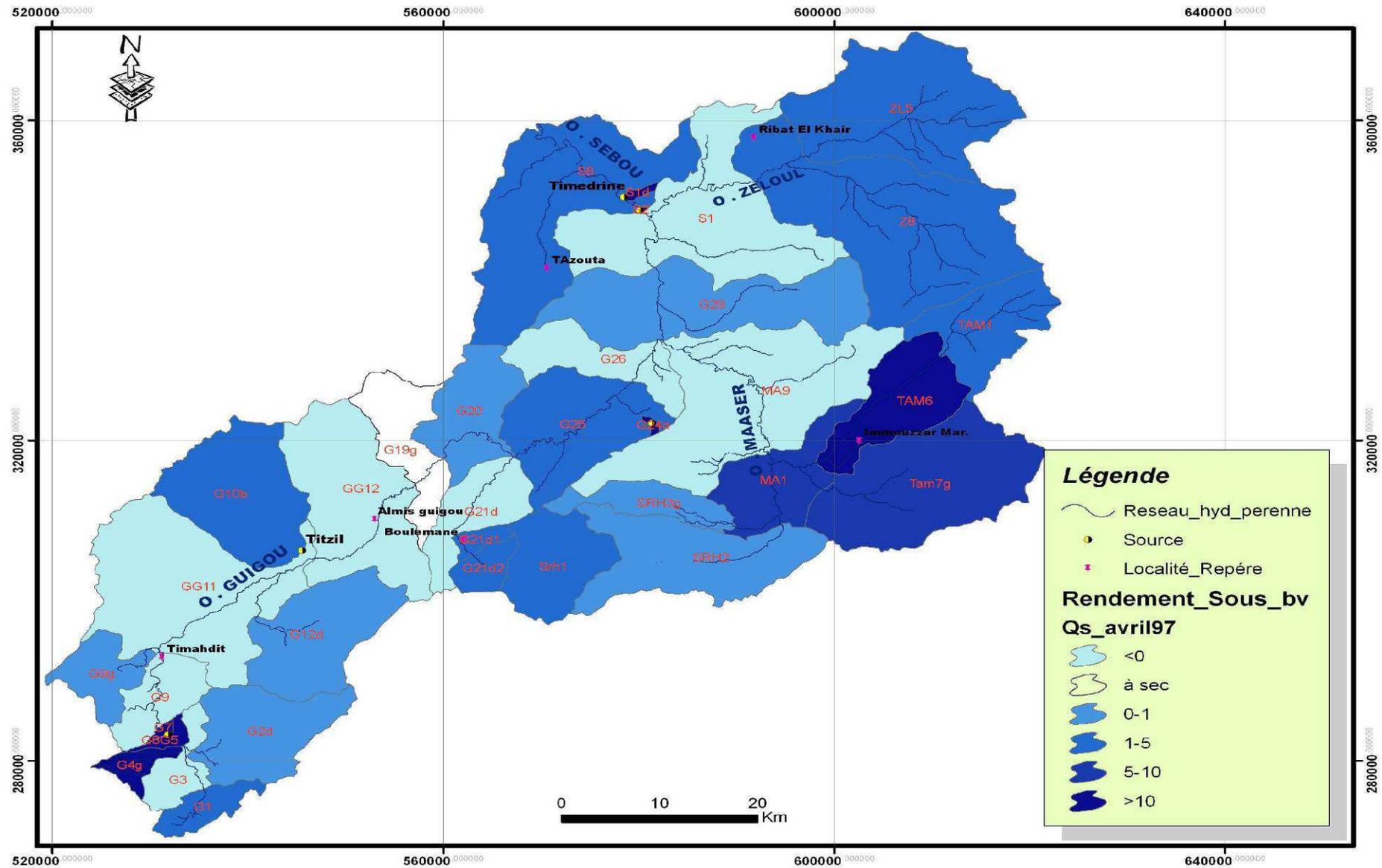


AïtKhabach

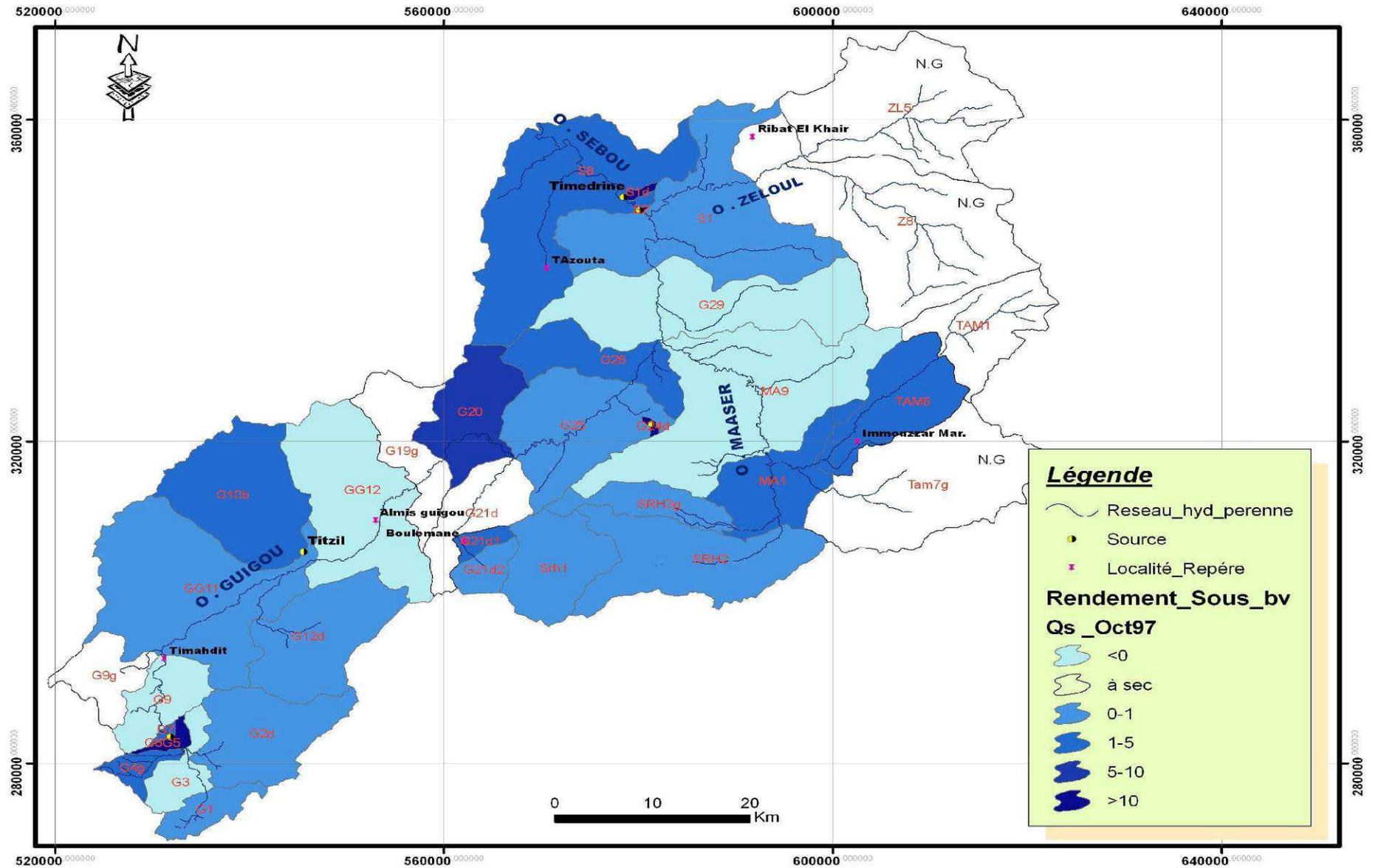


Rivière : sebou				Jaugeage n° :					
Heure Début : 12:35				Date de création :		29/06/10			
Bassin versant		sebou		Code Point :		S8			
code hydro				Superficie du bassin versant :		km ²			
PK				Emplacement : 20 M amont pont					
Commune									
Département									
Système Lambert		X Lambert	Y Lambert	Z altitude					
Opérateurs : MANCEAU QADEM		Station Hydrométrique : AZZABA		Hauteur début :		1.92 cm			
				Hauteur fin :		1.92 cm			
JAUGEAGE PAR INTEGRATION		Gestionnaire : LAGEA		Hélice :		3.81149			
		Kf = 1	K = 1	Mode Calcul :		Médiane Moyenne			
	Abscisses (m)	Hauteurs (cm)	Coefficient rive		Débit : 16.010 m³/s				
Rd	25.5	0	0.5						
Rg	0	0	0.5						
Tableau de Saisie de données				Tableau de calcul					
	absc.(m)	Prof. (cm)	Contacts	Temps (s)		Abscisses (m)	Profondeurs (cm)	vitesse (m/s)	Pu (m ² /s)
1	0.66	16.3	20	8.0	Rg	0.00	0.00	0.000	0.000
2	3.16	28.4	47	13.9	1	0.66	18.80	0.642	0.121
3	5.66	30.0	47	14.7	2	3.16	30.90	0.868	0.268
4	8.16	31.4	55	15.4	3	5.66	32.50	0.822	0.267
5	10.66	38.8	74	19.9	4	8.16	33.90	0.917	0.311
6	13.16	45.5	75	17.1	5	10.66	41.30	0.955	0.394
7	15.66	53.0	151	19.9	6	13.16	48.00	1.127	0.541
8	18.16	67.8	83	11.4	7	15.66	55.50	1.948	1.081
9	23.00	77.0	83	13.8	8	18.16	70.30	1.868	1.313
10	24.00	61.0	13	10.0	9	23.00	79.50	1.543	1.227
11					10	24.00	63.50	0.334	0.212
12					Rd	25.50	0.00	0.000	0.000
13									
14									
15									
16									
17									
18									
Résultats code : 136 BDH				BONNES					
Profil de la Section Mouillée									
<p>- La section</p> <p>Type de section : Régulière ou canalisée</p> <p>Nature du fond du lit : Lit à dépôts compacts</p> <p>Rugosité : Ni Obstacle Ni Végétation</p>									
<p>- L'hydraulique</p> <p>Écoulement : Bien réparti</p> <p>Type écoulement : Laminaire</p> <p>Niveau de l'eau : Nulle ou faible</p>									
S. Mouillée (m ²)	Vit. Moy. (m/s)	R. Hydraulique (m)	P. Mouillé (m)	Prof. Moy (m)	Largeur (m)	H. Max (m)	Vit. Max (m/s)		
12.04	1.32	0.47	25.68	0.47	25.5	0.795	1.95		

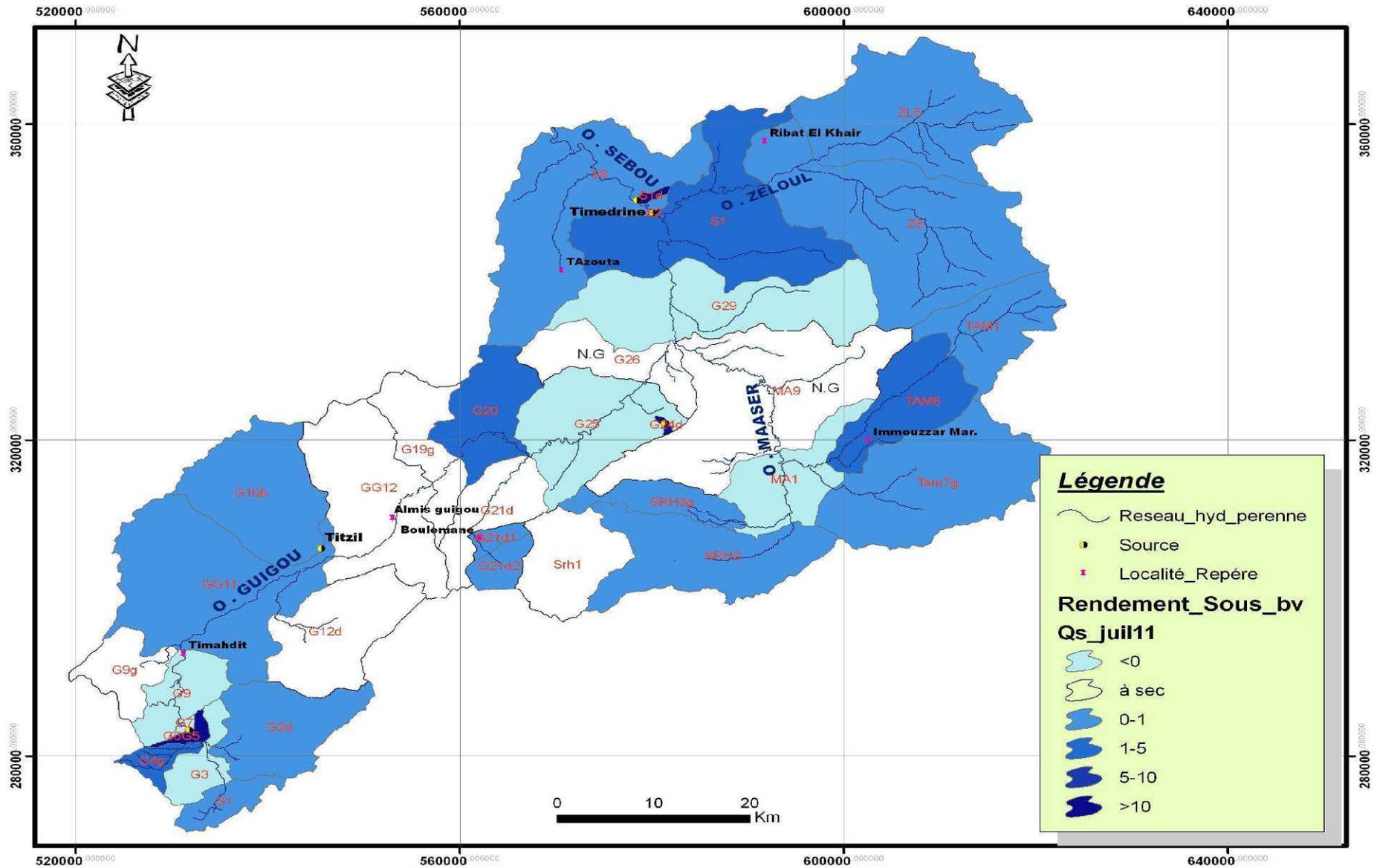
Annexe 6.2 : Rendement hydrologique par bassin unitaire



Annexes



Annexes



Chapitre 9

Annexe 9.1. : Questionnaires d'enquête.

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Faculté des Lettres Saïs

Laboratoire d'analyses géo-environnementale et d'aménagement

QUESTIONNAIRE SUR LES RESSOURCES EN EAU SUPERFICIELLE

Dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat nous entreprenons une recherche scientifique portant sur la gestion des ressources en eaux dans le Haut Sebou au Moyen Atlas Central.

Nous vous garantissons l'anonymat et la confidentialité de toutes les informations contenues dans ce questionnaire.

Veillez accepter nos sincères remerciements pour votre collaboration.

I- Données de calage :

1) Informations générales

Date d'enquête :/ /2012

L'unité géographique : La commune :

Le douar :

Nom de la rivière la plus proche:

Nom de la source la plus proche:

Nom de la seguia la plus proche

2) La superficie

Combien d'hectare irrigué possédez-vous?

<1 ha	1-3 ha	3-6 ha	6-9 ha	>10 ha

Est-ce que vous pensez étendre la superficie irriguée ?

Oui Non

II- Systèmes et fonctionnement de l'irrigation :

1) Le réseau d'irrigation

Qu'elle est la nature de draine de l'eau et de la seguia qui lie vos unités irriguées à la prise-seguia -?

Terre	béton	canal de plastique
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Savez vous que la seguia est en terre peut contribuer au gaspillage de l'eau (évaporation, infiltration) ?

Oui Non

Qui se charge de :

a) *l'entretien du réseau d'irrigation* ?.....

b) *La gestion des travaux* ?.....

c) *Le curage* ?.....

2) le fonctionnement

L'eau est exploitée sans limite Oui Non

ou vous suivez un tour cyclique ? Oui Non

Décrivez le tour d'eau mis en place ?.....

Est-ce que la quantité des eaux que vous avez pendant chaque tour vous suffit ?

Oui Non

Est-ce que vous louez l'eau d'un autre agriculteur ? Oui Non

Si oui combien d'heure?.....

Est-ce que vous louez l'eau à un autre agriculteur? Oui Non

Si oui combien d'heure ?.....

Le coût horaire de la location de l'eau de la seguia :dh.

Dans le cas d'une unité cultivée durant la saison sèche, elle aura besoin de combien de tours d'irrigation ?

3 tours	4 tours	5 tours	6 tours	7 tours

Est-ce que vous pratiquez l'assolement biennal ?

Oui Non

Est-ce que vous voyez que le partage des eaux entre les tribus et les agriculteurs est équitable ?

Oui Non

Si non

Pourquoi ?.....

Mettez en ordre les types de culture que vous pratiquez selon l'importance.

Céréale	maraichage	légumineuse	arboriculture	autre

Est-ce que vous avez déjà eu un conflit avec un autre agriculteur sur l'utilisation des eaux ?

Oui Non

Ou entre des tribus ? Oui Non

III- Modernisation et réaménagement

Est-ce que vous pensez remplacer les types des cultures existantes par d'autres cultures moins consommatrices en eaux ?

Oui Non

Savez vous que l'état subventionne la création de nouvelles plantations (5000dh/ha : avec le système gravitaire et 6000dh/ha avec la technique de goutte à goutte),

Oui Non

Est-ce que vous avez bénéficié du programme ?

Oui Non

Est-ce que vous avez des parcelles équipées par la technique du goutte à goutte ?

Oui Non

Est-ce que vous ne pensez pas équiper vos parcelles par la technique du goutte à goutte ?

Oui Non

Si oui citez les contraintes qui peuvent vous en empêcher ?

.....

Est-ce que vous avez bénéficié des campagnes de sensibilisation par les acteurs chargés de l'eau ou d'agriculture concernant la gestion des ressources en eau ?

Oui Non

L'organisation des usagers de l'eau

Êtes-vous des avantages offerts par la loi aux usagers de l'eau organisés en coopératives ?

Avez-vous tenté l'expérience ? Décrivez les avantages et inconvénients ?

Remarques.....
.....

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah

Faculté des Lettres Saïs

Laboratoire d'analyses géo-environnementale et d'aménagement

Date d'enquête	
La commune	
Le douar	
L'unité géographique	
Nom du puits	

QUESTIONNAIRE SUR LES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

Dans le cadre de la préparation d'une thèse de doctorat nous entreprenons une recherche scientifique portant sur l'inventaire des puits et leurs utilisations dans le Haut Sebou dans Moyen Atlas central.

Nous vous garantissons l'anonymat et la confidentialité de toutes les informations contenues dans ce questionnaire.

Veillez accepter nos sincères remerciements pour votre collaboration.

1) Le creusement du puits :

A- Coordonnées et date de réalisation

	Puits 1	Puits 2	Puits 3
X
Y
Date de creusement			
Profondeur			

B- Approfondissement

Est que vous avez approfondi le puits (s) après le premier creusement ?

Oui Non

a) Si oui Combien de fois ?..... b) Quand ?.....

c) Et combien de
mètre ?.....
.....

d) Pourquoi ?
.....
.....

e) Coût d'investissement ?
.....

2) L'extraction des eaux du puits

A) Les techniques

Quelle est la technique d'exore utilisez-vous ?

a) Traditionnelle b) Moderne

Quelle énergie vous utilisez pour mobiliser les eaux du puits ?

	Manuelle	Electrique	Solaire	Gasoil	Gaz
Energie utilisée					
Energie préférée					

Est qu'il y a d'autres utilisateurs du puits ?

Oui Non

Si oui, Lesquels ?

Est-ce que vous vendez l'eau pour d'autres usagers ?

B) La fréquence d'utilisation

Combien de fois vous utilisez les eaux du puits ?

quotidiennement	une fois par semaine	2-3fois par semaine	4-6 fois par semaine

Si vous utilisez une motopompe, combien d'heure par la fois ?.....h.

Qu'ils sont les mois où vous utilisez beaucoup les eaux du puits ?

Jan	Fév.	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc

Qu'ils sont les contraintes que vous retrouvez pour creuser ou utilisez les eaux du puits ?

L'autorisation	la profondeur de la nappe	les frais du creusement	les frais de pompage

Est que vous avez une idée sur l'évolution de la nappe phréatique dans cette zone ?

Oui

Non

C) L'utilisation des eaux du puits

Vous utilisez les eaux du puits pour :

l'eau potable	L'usage domestique	L'abreuvement du bétail	L'agriculture	autre

Si vous utilisez les eaux du puits pour l'agriculture, qu'ils ont les types de cultures ?

Blé	Orge	Mais	Pomme de terre	oignon	arboriculture	autre

Qu'il est la superficie irrigué par les eaux du puits ?

<1 ha	1-3 ha	3-6 ha	6-9 ha	>10 ha

A votre avis, qu'ils sont les type de cultures la plus consommatrices de l'eau ?

Céréale	maraîchage	arboriculture	autre

L'autorisation : Oui

Non

Remarques

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Annexe 9.2 : Codage des questionnaires dans SPSS

Codage enquête Puits.sav - Editeur de données SPSS

Fichier Edition Affichage Données Transformer Analyse Graphes Outils Fenêtre Aide

	Nom	Type	Largeur	Décimal	Etiquette	Valeurs	Manquant	Colonnes	Aligner	Mesure
1	unitegeo	Chaîne	22	0	Unité géo	Aucun	Aucun	8	Droite	Nominale
2	commune	Chaîne	22	0	Commun	Aucun	Aucun	8	Droite	Nominale
3	douar	Chaîne	22	0	Douar	Aucun	Aucun	8	Droite	Nominale
4	nbpuit	Numérique	7	0	Nombre d	{1, 1}...	Aucun	8	Droite	Echelle
5	xp1	Virgule	28	10	X puits 1	Aucun	Aucun	11	Droite	Echelle
6	yp1	Virgule	8	3	Y puits 1	Aucun	Aucun	11	Droite	Echelle
7	datcrep1	Numérique	17	1	Date de c	{1.0, Av	Aucun	14	Droite	Echelle
8	profp1	Virgule	8	0	Profondeu	{1, < 10	Aucun	8	Droite	Echelle
9	piézp1	Virgule	8	0	Piézomet	{1, < 10	Aucun	8	Droite	Echelle
10	xp2	Virgule	15	5	X puits 2	Aucun	Aucun	8	Droite	Echelle
11	yp2	Virgule	15	5	Y puits 2	Aucun	Aucun	8	Droite	Echelle
12	datcrep2	Virgule	11	0	Date de c	{1, Ava	Aucun	8	Droite	Echelle
13	profp2	Virgule	14	0	Profondeu	{1, < 10	Aucun	8	Droite	Echelle
14	piézp2	Virgule	14	0	Piézomét	{1, < 10	Aucun	8	Droite	Echelle
15	xp3	Virgule	14	5	X puits 3	Aucun	Aucun	8	Droite	Echelle
16	yp3	Virgule	14	5	Y puits 3	Aucun	Aucun	8	Droite	Echelle
17	datcrep3	Virgule	12	0	Date de c	{1, Ava	Aucun	8	Droite	Echelle
18	profp3	Virgule	10	6	Profondeu	{1.0000	Aucun	8	Droite	Echelle
19	piéz	Virgule	8	0	Piézomét	{1, < 10	Aucun	8	Droite	Echelle
20	approff	Numérique	14	0	Approffon	{1, oui}	Aucun	8	Droite	Echelle
21	sioui	Point	8	0	Si oui co	{1, 1}...	Aucun	8	Droite	Echelle
22	quand1	Numérique	8	0	Quand1	{1, Ava	Aucun	13	Droite	Echelle
23	quand2	Numérique	8	0	Quand2	{1, Ava	Aucun	8	Droite	Echelle
24	quand3	Numérique	8	0	Quand3	{1, Ava	Aucun	8	Droite	Echelle
25	cmbdem	Point	8	2	Et combi	{1.00, <	Aucun	8	Droite	Echelle
26	pourquoi	Numérique	40	0	pourquoi	{1, ass	Aucun	17	Droite	Echelle
27	coût	Point	22	0	Coût d'inv	{1, <10	Aucun	8	Droite	Echelle
28	techniq	Numérique	40	0	Quelle es	{1, tradi	Aucun	13	Droite	Echelle
29	enerutil	Numérique	40	0	Quelle én	{1, man	Aucun	16	Droite	Echelle
30	enerpré	Numérique	8	2	Quelle én	{1.00,	Aucun	8	Droite	Echelle
31	autreuti	Numérique	8	0	Est qu'il y	{1, oui}	Aucun	8	Droite	Echelle
32	siouiqui	Numérique	8	0	Si oui, Le	{1, les v	Aucun	8	Droite	Echelle
33	vente	Numérique	8	2	Est-ce qu	{1.00, o	Aucun	8	Droite	Echelle
34	fréquenc	Numérique	40	0	Combien	{1, quot	Aucun	11	Droite	Echelle

Affichage des données Affichage des variables

SPSS processeur est prêt

Démarrer

Equête doctorat

Chapitre-10-1_revu seb...

Annexe 9.3 : Procédure d'octroi d'autorisation de creusement de puits et réalisation des forages

