

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	11
2-OBJECTIFS DE LA MODELISATION.....	14
PREMIERE PARTIE	
CHAPITRE I.....	16
1- Synthèse sur les démarches de la modélisation pluie /débit et outils méthodologiques.....	17
1-6 Conclusion de la première partie.....	31
CHAPITRE II.....	32
2 Considérations générales du bassin d'étude.....	33
2- Contexte général du bassin de la Tafna.....	33
DEUXIEME PARTIE	
CHAPITRE III.....	51
3 Méthodes de critique et analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la tafna.....	52
3-5 analyse des régimes pluviométriques et hydrométriques.....	67
3-6 Résultats de l'analyse sur les régimes pluviométriques et hydrométriques.....	73
3-6-1 Résultats de l'analyse du régime pluviométrique et détection de.....	73
3-7 Conclusion.....	85
CHAPITRE IV.....	87
4- Evaluation du bilan hydrologique annuel du bassin de la Tafna par consolidation géostatistique et par modélisation pluie-débit.....	88
4-3 Présentation du modèle pluie-débit utilisé : GR4j semi-distribué.....	108
4- Vers une amélioration du calage et de la validation avec la prise en compte du biais dans les Nash.....	125
6- Conclusion.....	135
CHAPITRE V.....	136
5- Analyse de sensibilité et évaluation de la performance du modèle GR4j semi-distribué.....	137
5-6 Conclusion.....	151
RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION GENERALE.....	152
Annexe_1 (Travaux avec HydroDem).....	167
Annexe_2 (Principe de l'adaptation de GR4 aux besoins de la simulation semi-distribuée).....	169
Annexe_3 (Simplex method).....	170
Annexe_4 (Régime mensuel des pluies/debits).....	171
Annexe_5 (Publication).....	173

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	11
1- LA MODELISATION DANS LES BASSINS VERSANTS	12
1-1 Bassin non jaugé	12
1-2 Concept de régionalisation dans les bassins versants non jaugés	13
1-3 Bassin peu jaugé - bassin non jaugé	14
2-OBJECTIFS DE LA MODELISATION	14
PREMIERE PARTIE	15
CHAPITRE I	16
1- Synthèse sur les démarches de la modélisation pluie /débit et outils méthodologiques	17
1-1 Hydrologie et modélisation pluie-débit	17
1-2 Classification des modèles pluie-débit	18
1-2-1 Modèle global vs distribué	19
1-2-2 Modèle conceptuel vs physique	19
1-2-3 Modèle déterministe vs stochastique	19
1-2-4 Modèle événementiel vs continu	19
1-3 Composants de la structure d'un modèle pluie/débit	21
1-3-1 Fonction de production	22
SCS	23
GR	23
1-3-2 Hydrogramme Unitaire	24
a- Hydrogramme Unitaire Instantané	24
b- Hydrogramme Unitaire Conceptuel	24
c- Hydrogramme Unitaire Géomorphologique (GUH)	25
1-4 Mise en œuvre d'un modèle hydrologique	25
4-1 Calage des paramètres	25
4-2 Validation du modèle	25
4-3 Incertitudes en modélisation hydrologique	25
4-4 Critères d'ajustement	26
-Critère de NashSutcliffe	26
-Critère de Nash borné	26
1-5 Les modèles GR (génie rural)	27
5-1 Introduction	27
5-2 Historique	27
5-3 Le Modèle GR4j	28
a-Description Mathématique	29
1-6 Conclusion	31
CHAPITRE II	32
2 Considérations générales du bassin d'étude	33
2- Contexte général du bassin de la Tafna	33
2-1 Localisation et cadre général de la zone étudiée	33
2-2 Données et critiques	35
a- Données hydrométriques et pluviométriques	35
*Présentation	35
*Prétraitement	
statistique	35
b- Prétraitement des données altimétriques	36

*Modèle Numérique de Terrain (MNT) et structuration du réseau hydrographique:.....	36
1- MNT du bassin de la Tafna.....	36
2-Coefficient de Gravelius.....	36
3-Rectangle équivalent.....	37
4-Densité de drainage.....	37
5-Rapport des longueurs.....	37
a-Rapport de confluence.....	37
b-Rapport des longueurs.....	38
2-3 Géomorphologie.....	38
1-Zones en altitude.....	40
a-Sous bassins de	
<i>Khemis</i>	41
<i>b-Sous bassin de Béni Bahdel appelé parfois de Sebdu</i>	41
<i>c-Sous bassin de</i>	
<i>Sikkak</i>	41
2-Zones de plaine.....	41
a-Sous bassin de	
<i>Mouïleh</i>	41
<i>b-Bassin contrôlé par la station hydrométrique de Zenata</i>	42
2-4 Géologie.....	42
1- Le Primaire.....	45
2- Le Secondaire.....	45
3- Le Crétacé.....	45
4- Le Tertiaire.....	45
5- Le Plio-Quaternaire.....	45
2-5 Hydrogéologie.....	46
2-6 Aperçu climatique de la zone d'étude.....	48
1-7 Conclusion.....	49
DEUXIEME PARTIE.....	50
CHAPITRE III.....	51
3 Méthodes de critique et analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la tafna.....	52
3-1 Introduction et objectifs de cette partie.....	52
3-2 La mesure en hydrologie.....	53
3-3 L'utilité de la critique de données.....	53
1- Choix des stations.....	54
2- Quelle serait la technique de correction adaptée pour notre cas d'étude ?.....	58
3-4 Contrôle des données pluviométriques et hydrométriques.....	61
1- Contrôle des données pluviométriques et hydrométriques.....	61
a- Contrôle des données pluviométriques.....	61
1- Méthode des cumuls simples appliquée sur les mesures pluie/débits.....	61
2- Méthode des doubles cumuls appliquée aux données pluviométriques.....	62
3-Ellipse de Bois appliquée sur les données pluviométriques.....	64
b- Contrôle des données hydrométriques.....	65
a) critique des données hydrométriques.....	65
3-5 analyse des régimes pluviométriques et hydrométriques.....	67
3-5-1 Méthodes appliquées pour la description des régimes pluviométriques et hydrologiques.....	68
1- Régime pluviométrique.....	68
2- Régime hydrologique.....	68
a-Hydraulicité.....	69
b-Hydrogrammes normés.....	69
c- Courbes des débits classés.....	70

d- Calcul de l'écoulement de base et du Base Flow Index (BFI)	70
3-5-2 Méthodes appliquées pour la détection des tendances et ruptures sur les données de pluies et de débits.	71
1- Détection de ruptures.....	71
2- Détection de tendances linéaires.....	71
3- Comparaison d'échantillons	72
3-6 Résultats de l'analyse sur les régimes pluviométriques et hydrométriques	73
3-6-1 Résultats de l'analyse du régime pluviométrique et détection de <i>tendances/ruptures</i>	73
1- Régime annuel des précipitations	73
2- Indice des précipitations saisonnières ou PCI.....	74
3- Précipitations mensuelles	74
4- Détection de tendances et ruptures sur les chroniques des précipitations	75
5- Analyse de tendance/rupture sur la série de température	75
3-6-2 Résultats d'analyse sur les régimes hydrologiques et analyse de <i>tendance/rupture</i>	77
1- Hydraulicité.....	77
2- Etude des débits classés.....	78
3- Ecoulement mensuel.....	79
4- Les hydrogrammes normés.....	80
5- Ecoulements annuels et analyse des tendances/ruptures.....	81
6- Débits de base et analyse des tendances/ruptures	82
7- Indice d'écoulement de base ou Base Flow Index (BFI) et analyse des tendances et ruptures	83
3-7 Conclusion	85
CHAPITRE IV	87
4- Evaluation du bilan hydrologique annuel du bassin de la Tafna par consolidation géostatistique et par modélisation pluie-débit	88
1- Généralités	88
2- Choix des outils retenus.....	89
3- Brève description des fonctionnalités du logiciel hydrodem	91
3-1 Le logiciel HydroDem.....	91
3-2 -Exemple de cartes dérivées d'HydroDem	92
a- Carte des sous bassins.....	93
b- Carte de drainage.....	93
c- Carte de distance par rapport à l'exutoire.....	95
4- Evaluation préliminaire du bilan hydrologique dit bilan consolidé.....	96
4-1 Paramètres du bilan consolidé	98
1- Interpolation et correction des précipitations.....	99
2- Interpolation des débits et de l'évaporation.....	102
a- Spatialisation de la donnée débit	102
b- Spatialisation de l'évaporation	104
4-2 Bilan consolidé	105
4-3 Présentation du modèle pluie-débit utilisé : GR4j semi-distribué.....	108
3-1 Application de GR4j semi-distribué par sous bassins	109
a- Mise en œuvre du modèle.....	110
b- Mise en œuvre du calage et de la validation du modèle.....	110
c- Valeurs des paramètres de GR4j semi-distribué.....	113
3-2 Résultats des simulations par sous bassins	115
1- Sous bassin de khemis	116
2- sous bassin de Béni-Bahdel	118
3- Sous bassin de Maghnia-Frontière	120
4- Sous bassin de Sikkak.....	121
5- Sous bassin de Zenata.....	123

3-3 Conclusion partielle.....	124
4- Vers une amélioration du calage et de la validation avec la prise en compte du biais dans les Nash	125
4-1 Bilan hydrologique par la version GR4j semi-distribuée	128
a)-Les précipitations	128
b)-L'évapotranspiration réelle	129
c)-L'écoulement	129
5- Bilan annuel Tafna	130
5-1 Bilan mensuel sur Khemis.....	133
6- Conclusion	135
CHAPITRE V	136
5- Analyse de sensibilité et évaluation de la performance du modèle GR4j semi-distribué.....	137
5-1 Analyse de sensibilité.....	137
a) Méthodes d'analyse de sensibilité	137
b) Méthodes d'analyse d'incertitudes.....	137
5-2 Buts et principe	137
5-3. Optimisation multiobjectif	138
1- Position du problème	138
2- Terminologie	138
3- Solutions Pareto-optimales	138
4- Méthodes de résolution.....	140
5- Evaluation des performances	141
5-4. Application au modèle GR4j semi distribué du bassin de la Tafna	142
1- Evaluation de la performance	142
2- Sensibilité des paramètres	143
5-4 Vers une méthode alternative de re-échantillonnage	147
5-5 Sensibilités sur le bilan	150
5-6 Conclusion	151
RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION GENERALE	152
1-Recommandations	153
2- Conclusion générale	153
Annexe_1 (Travaux avec HydroDem).....	167
Annexe_2 (Principe de l'adaptation de GR4 aux besoins de la simulation semi-distribuée)	169
Annexe_3 (simplex method)	170
Annexe_4 (REGIME MENSUEL DES PLUIES/DEBITS)	171
Annexe_5 (Publication).....	173

LISTE DES FIGURES

-Figure. 1 Schéma simplifié d'un modèle pluie débit.....	9
-Figure. 2 Schéma des variables d'un modèle pluie-débit	18
-Figure. 3 Classification des modèles pluies/débits. Koussis (2002)	20
-Figure. 4 Schéma représentant le fonctionnement d'un modèle pluie-débit.....	20
-Figure. 5 Schéma André Musy (1998) modèle à réservoir	21
-Figure. 6 Structure d'un modèle Pluie/Débit d'après Perrin (2000)	21
-Figure. 7 Schéma du modèle GR4J Perrin et al(2003)	28
-Figure. 8 Schéma de la structure du modèle GR2M.....	31
-Figure. 9 Localisation du secteur d'étude et les communes drainées.	33
-Figure. 10 Carte de la disposition des différents reliefs dans la région de la Tafna.....	39
-Figure. 11 Géomorphologie du bassin de la Tafna.	40
-Figure. 12 Emplacements des sous bassins étudiés	42
-Figure. 13 : A) Coupe géologique à travers la vallée de la moyenne Tafna.	43
-Figure. 14 Extrait de la carte géologique d'Oujda au 1/500000°.....	44
-Figure. 15 Log stratigraphique des différentes formations géologiques	46
-Figure. 16(a, b) Log hydrogéologique et carte de répartition du faciès carbonaté.....	47
-Figure. 17 Climat général du secteur étudié	48
-Figure. 18 Répartition des stations pluviométriques et hydrométriques.....	56
-Figure. 19 Détection des valeurs aberrantes dans les chroniques journalières de pluies.....	59
-Figure. 20 Disponibilité des chroniques de débits (les lacunes apparaissent en blanc)	59
-Figure. 21 Disponibilité des chroniques de pluie (les lacunes apparaissent en blanc)	60
-Figure. 22 Représentations des cumuls simples	62
-Figure. 23 Représentation de la méthode des doubles cumuls	63
-Figure. 24 Représentation de la méthode des cumuls des résidus	65
-Figure. 25 Ecoulements dans les sous bassins étudiés sur un cycle hydrologique.....	66
-Figure. 26 Représentation des débits spécifiques en fonction	67
-Figure. 27 Exemple de calcul d'un hydrogramme normé au pas de.....	69

-Figure. 28	Illustration de la méthode de calcul du débit de base pour la station de Khemis.....	70
-Figure. 29	A)Cartographie du module annuel de la pluie sur le bassin de la Tafna et B) - Distributions des valeurs correspondantes.....	74
-Figure. 30	Représentation de l'indice de concentration	74
-Figure. 31	Variations des précipitations moyennes mensuelles.....	75
-Figure. 32	Chronique des températures moyennes annuelles	76
-Figure. 33	Chronique des températures de printemps	76
-Figure. 34	Représentation de l'hydraulicité dans les sous bassins étudiés.	77
-Figure. 35	Représentation courbes des débits classés normalisés par le module annuel et des débits spécifiques classés.....	78
-Figure. 36	Régime mensuel des sous bassins de Béni-Bahdel,.....	79
-Figure. 37	Hydrogrammes normés extraits des sous bassins de la Tafna	80
-Figure. 38	variations saisonnières des évènements extrêmes	81
-Figure. 39	(a) Distribution des débits moyens annuels pour les cinq stations	82
-Figure. 40	Chroniques de débit de base moyen annuel pour la station de Beni-Bahdel.	83
-Figure. 41	Chroniques de BFI annuel.	84
-Figure. 42	Pression exercée sur la demande en eau dans	89
-Figure. 43	Représentation de l'interface d'HydroDem.....	92
-Figure . 44	Carte des sous bassins vu à travers HydroDem.....	93
-Figure . 45	Représentation de la carte de drainage final restitué sous	94
-Figure 46	Sens de l'écoulement dans le plan de drainage d'Hydrodem	95
-Figure. 47	Carte de la distance jusqu'à l'exutoire	96
-Figure. 48	Schéma général du concept du bilan consolidé appliqué au bassin de la Tafna.	97
-Figure. 49	Carte des pluies moyennes interannuelles (mm)	100
-Figure. 50	Variance de l'estimation ponctuelle des pluies en mm.	101
-Figure. 52	Estimation <i>a priori</i> de l'évapotranspiration. Noter l'empreinte du relief.	105
-Figure. 53	Consolidation du bilan hydrologique sur le bassin versant de la Tafna.	107
-Figure. 54	Schéma adopté de GR4J_semi-distribué.....	109
-Figure. 55	Performance du modèle selon variantes adoptées	113
-Figure. 56	Illustration de la variation du paramètre X1	114
-Figure. 57	Paramètre de transfert X3 obtenus par GR4j_semi-distribué	115
-Figure. 58	Comparaison des débits journaliers observés.	116
-Figure. 59	Extrait de chronique débits/pluies du sous basins de Khemis	117
-Figure. 60	Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Khemis	117
-Figure. 61	Extrait de simulation (debits observes/debits simulés) sur le bassin de Béni-Bahdel.....	118
-Figure. 62	Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Béni-Bahdel.....	119
-Figure. 63	Comparaison entre débits observes et simulés du sous bassin de Béni-Bahdel	119
-Figure. 64	Extrait de simulation (débits observes/débits simulés) sur le basin de Maghnia--Frontière	120
-Figure. 65	Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Maghnia-frontière ..	121
-Figure. 66	Droite de régression entre débits observes et simulés du sous bassin de Maghnia-frontière	121
-Figure. 67	Extrait de simulation (débits observes/débits simulés).....	122
-Figure. 68	Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Sikkak	122
-Figure. 69	Droite de régression entre débits observes et simulés du sous bassin de Sikkak.....	123
-Figure. 70	Extrait de simulation (débits observes/débits simulés) sur le bassin de Zenata	123
-Figure. 71	Comparaison entre débits simulés et observés	124
-Figure. 72	Corrélation entre débits observes et simulés du sous bassin de Zenata.	124
-Figure. 73	Technique de Calage/Validation proposées	126
-Figure. 75	Carte des précipitations annuelles en mm	128
-Figure. 76	Carte de l'ETR (mm) issue du bilan GR4	129
-Figure. 77	Carte de l'écoulement issue du Bilan GR4	130
-Figure. 78	Variation interannuelle du bilan.....	131
-Figure. 79	Variation mensuelle interannuelle des paramètres du bilan	132
-Figure. 80	Régression entre les précipitations et les écoulements	133

-Figure. 81 Variation mensuelle des paramètres du bilan sur le bassin de Khemis.....	134
-Figure. 81 Représentations de principe de Pareto.....	140
-Figure. 82 Résultats d'application de la fonction objective de Nash-Sutcliffe	144
-Figure. 83 Exemple de chroniques reconstituées.	146
-Figure. 84 Résultats d'application de la fonction objective après re-échantillonnage.	147
-Figure. 86 Représentation des effectifs et des densités.....	149

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.1 Récapitulatif des différentes méthodes de calcul de la fonction de production.....	23
Tableau. 2 Caractéristique des cinq barrages du bassin de la Tafna	34
Tableau. 3 Récapitulatif des paramètres morphométriques calculés.....	38
Tableau.4 Données des pluies.....	57
Tableau.5 Données des débits.....	57
Tableau.6 Indice de concentration des précipitations Oliver (1980).....	68
Tableau.7 Récapitulatif des calculs des ruptures et tendances sur le bassin de la Tafna.....	85
Tableau.8 Spatialisation de l'évapotranspiration.....	105
Tableau. 9 Récapitulatif Des Paramètres De Gr4j_Semi-Distribué.....	113
Tableau. 10 Moyennes Mensuelles Et Annuelles Interannuelle	131
Tableau. 11 Evaluation Des Eléments Du Bilan Mensuel Sur Le Bassin De Khemis.....	133
Tableau. 12 Bilan Hydrologique (Régime) Du Bassin#3	150

***INTRODUCTION GENERALE
ET OBJECTIFS DE L'ETUDE***

INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La modélisation pluie-débit est désormais un volet important des sciences hydrologiques. Elle permet d'entreprendre l'étude du comportement des bassins versants à travers l'établissement de leur bilan hydrologique. Plusieurs questions relatives à l'identification des processus dont ils sont le siège ainsi qu'aux modes de cheminement de l'eau y sont traitées.

Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement à l'analyse des bilans hydrologiques établis à l'aide des modèles de simulation des écoulements dans des bassins versants dont les échelles spatiales varient de quelques dizaines à quelques milliers de kilomètres carrés et les échelles temporelles d'ordre mensuel et journalier.

Le concept de « modèle » (Clarke, 1973), apparu dans les années cinquante, a permis de disposer d'un outil opérationnel grâce à une représentation de la réalité permettant de restituer *au mieux* le comportement des bassins.

Un large éventail de modèles ont été développés depuis que leur utilité a été admise par la communauté des hydrologues : modèle physique, modèle empirique, distribué, global, ... Cette diversité reflète la diversité de représentation des processus intervenant dans le cycle hydrologique de l'eau.

La première étape pour la mise en œuvre des modèles hydrologiques consiste à discrétiser le domaine spatial en unités présentant une relative identité, notion sur laquelle nous reviendrons dans la suite du document. Cette opération est suivie d'une discrétisation temporelle selon une échelle compatible avec les objectifs de l'étude.

Le contexte climatique de la zone à étudier (tempéré et ou aride) fait aussi partie des éléments fondamentaux qui orientent le choix du modèle.

Ces conditions sont traitées dans une question encore d'actualité relative à l'étude des bassins jaugés voire non jaugés.

1- LA MODELISATION DANS LES BASSINS VERSANTS

Les premières applications des modèles hydrologiques de type pluie-débit portaient sur des bassins jaugés, Il s'agit de bassins disposant de chroniques de pluies et de débits suffisamment longues pour pouvoir calibrer les paramètres des modèles. Depuis ces premières applications, la question des bassins non jaugés est devenue une priorité de la décennie 2000 (McDonnell et al., 2003 ; Blöschl, 2005),...

1-1 Bassin non jaugé

Selon l'organisation mondiale de la météorologie (1984) une couverture de stations « admissible » pour un bassin semi aride est de disposer d'au moins un poste pluviométrique tous les 100 à 250 km². Relativement à cette norme, un bassin non jaugé est défini comme un bassin dépourvu de mesures hydrométriques voire même de relevés pluviométriques. Cette situation est souvent rencontrée dans les zones arides et semi-arides.

Et, en effet, quand l'information hydrologique est absente ou rare, les modèles hydrologiques sont difficiles à calibrer. Certains auteurs ont cru pouvoir transposer les

INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

données d'un bassin jaugé vers un bassin non jaugé moyennant l'utilisation de méthodes de régionalisation qui exploitent les similarités de comportement sur la base de la proximité spatiale des bassins versants (Stedinger,1986; Juncker,1971 ; Blöschl, 2005 ; Degré et al.,2008).

1-2 Concept de régionalisation dans les bassins versants non jaugés

Les méthodes de régionalisation proposées pour l'étude des bassins non jaugés portent sur les débits d'étiage ou de crue (Blöschl, 2006), les précipitations (Hingray et al., 2009), ... Cette transposition des données d'un bassin jaugé vers un bassin non jaugé est le résultat (i) d'une phase d'identification des régions susceptibles d'être considérées comme homogènes relativement aux processus qui y prévalent et (ii) d'une phase d'application d'une méthode d'estimation appropriée à la variable transposée. Rojas-Serna (2005) donne une revue exhaustive de ces méthodes tandis que Zhang et Chiew (2009) suggèrent de recourir exclusivement à l'analyse de la proximité spatiale.

a) -Régionalisation par homogénéisation

L'homogénéisation est basée sur l'identification de toute ressemblance entre les bassins jaugés et non jaugés. L'extraction des similarités conduit à l'identification de zones homogènes. Il s'agit de regroupements de bassins ayant un même comportement par rapport à une caractéristique physiographique ou climatique (Rasmussen et al., 1994).

Lorsqu'on s'intéresse aux seules caractéristiques hydrologiques, tels que les débits extrêmes, la délimitation des zones homogènes est délicate suite aux incertitudes affectant les mesures (Parajka, 2005). C'est dire que l'efficacité de la méthode d'homogénéisation dépend de sa capacité à identifier et à délimiter les zones homogènes (Sivapalan et al., 2003).

b) -Régionalisation par régression

Le principe de la méthode consiste à établir par régression linéaire simple ou multiple les relations appropriées entre les variables d'intérêt d'un bassin connu et ses caractéristiques physiographiques et climatiques. Ces relations servent à déduire les variables des bassins non jaugés (non instrumentés). Les paramètres sont alors estimés par la méthode des moindres carrés pondérés (Stedinger et Tasker, 1986).

Cette technique de régionalisation demeure difficile à interpréter et n'aboutit pas toujours à un résultat. Elle est, cependant, la seule issue pour pallier aux problèmes de mesures des bassins non jaugés. Parajka et al. (2005) ainsi que Post et Jakeman (1997) l'ont expérimentée avec succès contrairement à Seibert (1999) et Peel et al. (2000). Pour cette raison, selon Parajka et al. (2005), les méthodes géostatistiques constituent une alternative qui donnent de meilleurs résultats.

INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

1-3 Bassin peu jaugé - bassin non jaugé

Peu jaugé, faiblement jaugé ou tout simplement bassin comportant peu de données sont les qualificatifs utilisés pour désigner des systèmes ayant des réseaux de stations de mesures hydrométriques et/ou pluviométriques peu développés.

Se pose alors la question de savoir à partir de quand on peut considérer un bassin comme étant non jaugé?

Hingray et al. (2009), Zhang et al. (2009) conviennent de définir une classe intermédiaire, dite classe de bassins peu jaugés, où les mesures hydrologiques sont peu informatives. D'aucuns assimilent ces bassins à des bassins non jaugés du moment que les mesures disponibles ne permettent pas d'en donner une bonne représentation.

2-OBJECTIFS DE LA MODELISATION

Dans cette étude, nous proposons des méthodes et approches pouvant contribuer à une meilleure évaluation de la ressource en eau pour une gestion plus efficace et durable de celle-ci. La quantification du bilan que nous proposons se base sur l'utilisation conjointe de deux approches :

La première repose uniquement sur l'analyse des données disponibles et s'appuie sur des fondements géostatistiques. La seconde utilise la modélisation pluie-débit.

Mais, eu égard au niveau de complexité du bassin étudié en termes de variabilité spatiale des pluies, de l'évapotranspiration potentielle et de l'hétérogénéité des sous-bassins versants, ces choix méthodologiques ne doivent pas éluder les questions relatives au type de modèle global, semi distribué ou distribué.

Quelle serait alors la performance du modèle choisi dans une zone soumise à un climat semi-aride et disposant de peu de mesures?

Pour y répondre nous avons subdivisé notre travail en deux parties comportant les chapitres suivants:

La première porte sur la démarche de modélisation ainsi que les approches et outils en vogue. Le second chapitre, expose le contexte général du bassin de la Tafna d'un point de vue géomorphologique en illustrant ses principales caractéristiques physiques, géologiques et climatologique.

La seconde partie traite de l'évaluation des bilans hydrologiques du bassin versant de la Tafna dans trois chapitres. Le premier (chapitre 3) présente l'analyse des données recueillies pour effectuer cette étude. Il inclut le contrôle des données et la méthode utilisée pour l'obtention de données aussi fiables que possible.

Il comporte aussi une section réservée à l'analyse des écoulements ainsi que la détection des tendances et ruptures dans le bassin étudié. Cette partie reprend le contenu d'un article (Bakretti et al, 2013) et propose quelques compléments.

Le chapitre suivant (chapitre 4) porte sur l'évaluation du bilan hydrologique du bassin de la Tafna au pas de temps interannuel, d'abord par une méthode géostatistique puis au pas de temps journalier à l'aide d'un modèle hydrologique conceptuel spatialisé par sous-bassins. Cette seconde approche du bilan utilise une version semi-distribuée du modèle GR4J.

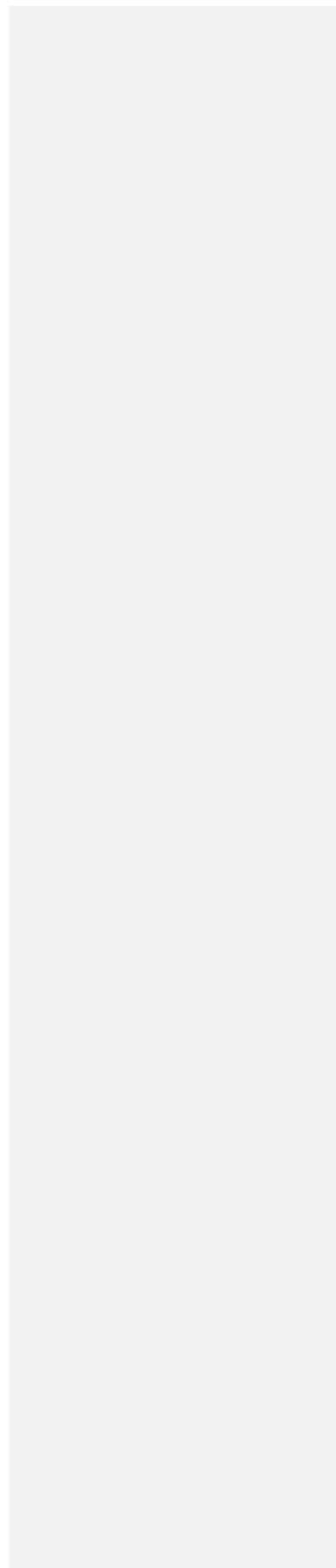
Dans le dernier chapitre (chapitre 5), la sensibilité du modèle GR4j_semi-distribué est évaluée. Nous présentons, en premier, la technique qui nous a permis d'analyser puis de

INTRODUCTION GENERALE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

discuter la sensibilité globale du modèle à ses paramètres et en seconde partie, la mise en évidence de l'incertitude sur les bilans obtenus à partir du modèle. De nouvelles suggestions concernant la méthodologie d'étude de sensibilité y sont proposées.

PREMIERE PARTIE

CHAPITRE I



1- Synthèse sur les démarches de la modélisation pluie /débit et outils méthodologiques

Cette partie est destinée à replacer la démarche de modélisation pluie-débit adoptée dans ce travail dans un contexte plus général en donnant un aperçu des diverses approches et outils dans ce domaine.

1-1 Hydrologie et modélisation pluie-débit

Les premiers modèles datent des années 70 (LeMoigne, 1977) ; (Musy, 1998). Un modèle y est défini comme une « *représentation schématique d'un phénomène physique pour mieux étudier ou analyser l'influence qu'il exerce* ». Dans le contexte hydrologique, il consiste à décrire les différentes phases du cycle de l'eau soit dans sa totalité soit juste en partie.

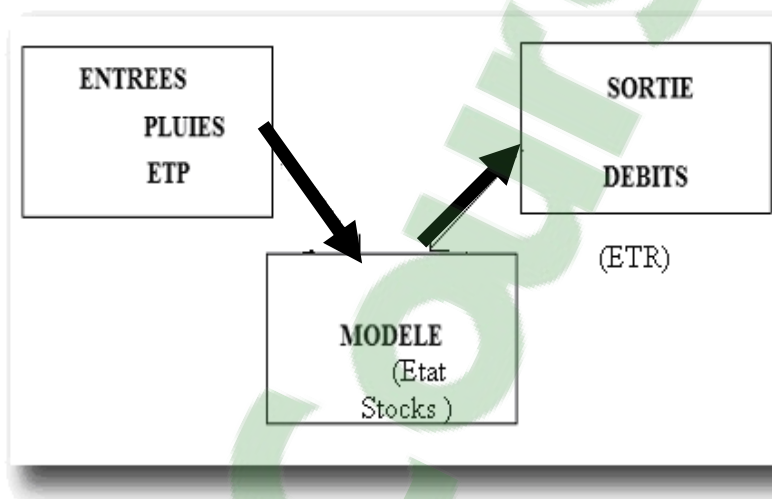


Figure.1 Schéma simplifié d'un modèle pluie-débit.

Le développement d'un modèle hydrologique repose sur (i) la connaissance du système (ii) l'objectif de modélisation (iii) le choix d'une formulation de la réalité.

En fait, le modèle est un compromis entre le réel et sa représentation. Son formalisme invoque des paramètres, généralement obtenus par calage, des variables de forçage relatives aux données d'entrées et de sortie, en l'occurrence la pluie et le débit ainsi que des variables d'état pour caractériser l'état du système (Figure 1, 2).

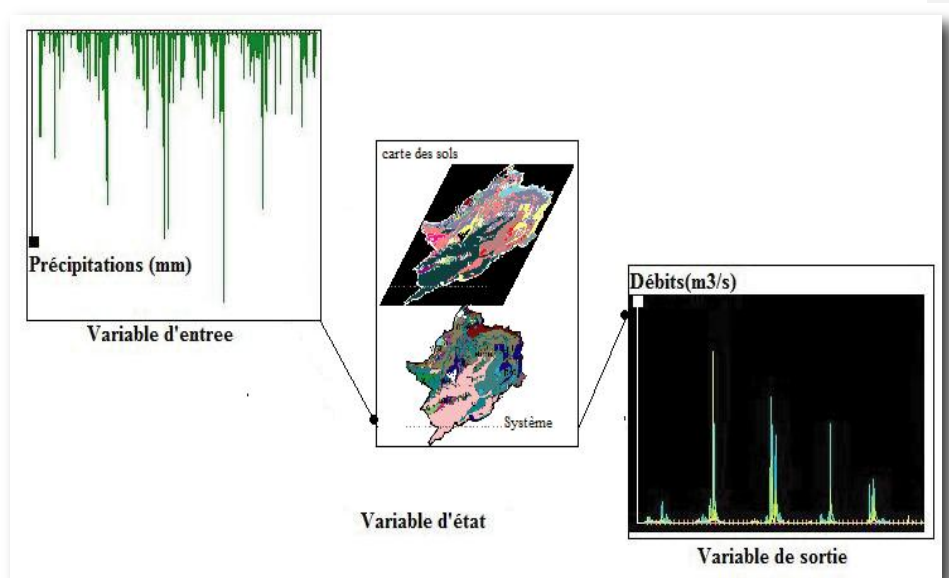


Figure. 2 Schéma des variables d'un modèle pluie-débit (inspiré de la représentation de Perrin http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/schertze/GTESD_CME/GTESD_CME_documents.html#cours2)

Aux fins de modélisation, Mouelhi (2003) suggère l'uniformisation préalable de toutes les variables en mm/pas de temps pour s'affranchir de l'effet de taille.

La transformation de la pluie en débit fait intervenir une *fonction de production* qui correspond à la partie de la pluie nette intervenant directement dans l'écoulement et une *fonction de transfert* qui décrit la manière dont les écoulements se propagent de l'amont vers l'aval du réseau hydrographique. Elle est souvent représentée par l'hydrogramme unitaire.

1-2 Classification des modèles pluie-débit

L'avènement de l'informatique participe en grande partie au développement de nombreux modèles. La littérature répertorie une panoplie de modèles qui témoignent de ces progrès. Les classifications les plus usitées répertorient les modèles sur les critères relatifs soit à la représentation dans l'espace (modèles globaux – modèles distribués), soit en rapport avec le type de représentation temporelle (événementiels - continus) soit encore sur une représentation selon les processus (modèles empiriques,...).

Nous présentons brièvement les grandes familles de modèles existants, illustrées d'exemples de quelques modèles en vogue. Nascimento (1995) et Perrin (2000) présentent des classifications plus approfondies, qui sont résumées, ci-dessous, figure.3.

1-2-1 Modèle global vs distribué

Un modèle est dit global lorsqu'il traite le bassin versant comme un seul objet spatial, autrement dit, comme une seule entité avec des propriétés uniformes. Dans le modèle distribué, le bassin est discrétisé en sous-unités ayant un comportement supposé homogène. Les modèles semi-distribués quant à eux représente l'hydrosystème en sous-bassins homogènes (Ambroise, 1998).

1-2-2 Modèle conceptuel vs physique

Dans les modèles physiques, on cherche à décrire les mécanismes internes du système en se basant sur la résolution d'équations aux dérivées partielles de la mécanique des fluides.

Les modèles conceptuels décomposent le comportement du bassin en sous-processus globaux. On parle souvent d'une représentation des bassins versants en réservoirs qui se remplissent et se vident les uns dans les autres et dont le fonctionnement est modulé par des paramètres empiriques (Ambroise, 1998).

1-2-3 Modèle déterministe vs stochastique

Un modèle déterministe se base sur la description physique d'un bassin. Les variables de sortie sont déterminées de manière unique (déterministe). Dans les modèles stochastiques, les variables d'entrée ou les paramètres sont considérés comme des variables aléatoires et la variable de sortie devient aussi une variable aléatoire (Gaume, 2002). Selon Musy (1998) ces modèles sont le plus souvent utilisés conjointement.

1-2-4 Modèle événementiel vs continu

Le modèle événementiel simule le débit consécutif à un événement pluvieux ponctuel (Linsley, 1982). Dans ce cas, on s'intéresse aux phénomènes les plus importants, responsables du pic de crue. Ces modèles nécessitent de pouvoir préciser l'état initial du bassin en fonction des conditions climatiques précédentes. La modélisation continue, quant à elle, reproduit la variation du débit dans le temps (Roche, 1988) et tient compte de l'ensemble des processus hydrologiques.

Rappelons que la classification que nous donnons ici est générale. Elle a été décrite pour mieux positionner le modèle utilisé dans notre étude : un modèle de type pluie-débit à caractère semi distribué. Les critères qui ont prévalu à son choix sont ceux énoncés par : (i) le modèle doit avoir des fondements scientifiques sains, (ii) les besoins en données doivent être en accord avec leur disponibilité, (iii) la complexité

du modèle doit être justifiée en termes de performances, (iv) le modèle doit être convenablement validé, (v) le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs.

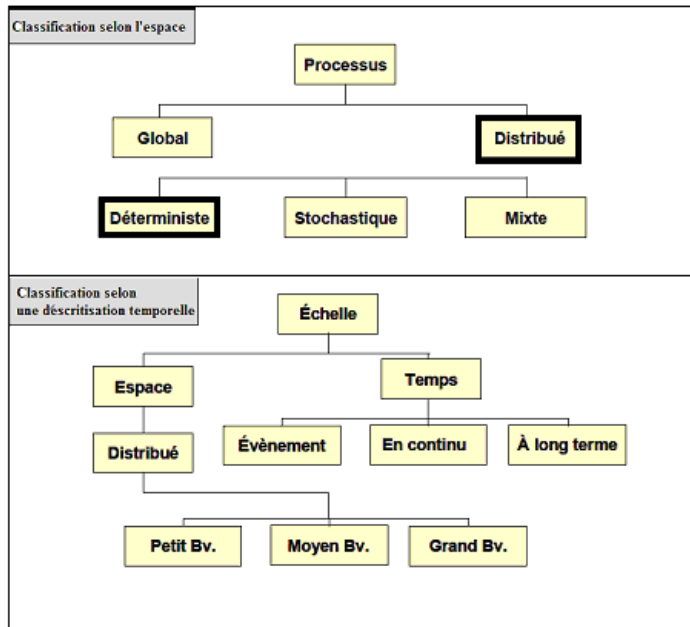


Figure. 3 Classification des modèles pluies/débits. Koussis (2002)

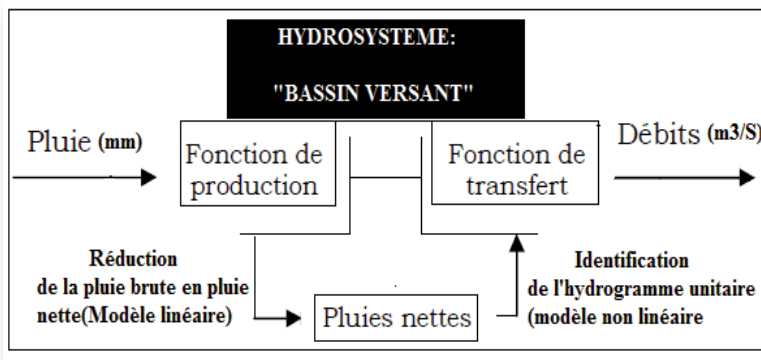


Figure. 4 Schéma représentant le fonctionnement d'un modèle pluie-débit. [Inspiré du schéma de Versiani (1983) et Boudhraa (2007)]

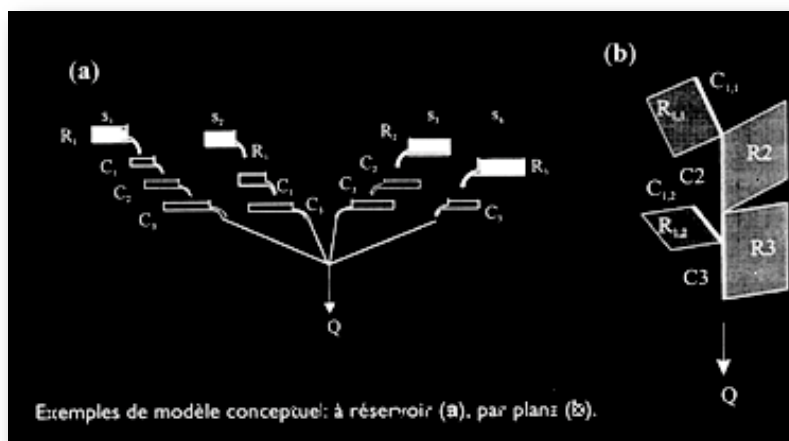


Figure.5 Schéma André Musy (1998) modèle à réservoir

1 -3 Composants de la structure d'un modèle pluie/débit

L'un des objectifs de la modélisation pluie-débit sur un bassin versant est d'analyser la réponse du système (débit) à une pluie en invoquant des hypothèses simplificatrices.

Nous nous sommes intéressés à la modélisation faisant intervenir une fonction de production et une fonction de transfert (figure.6).

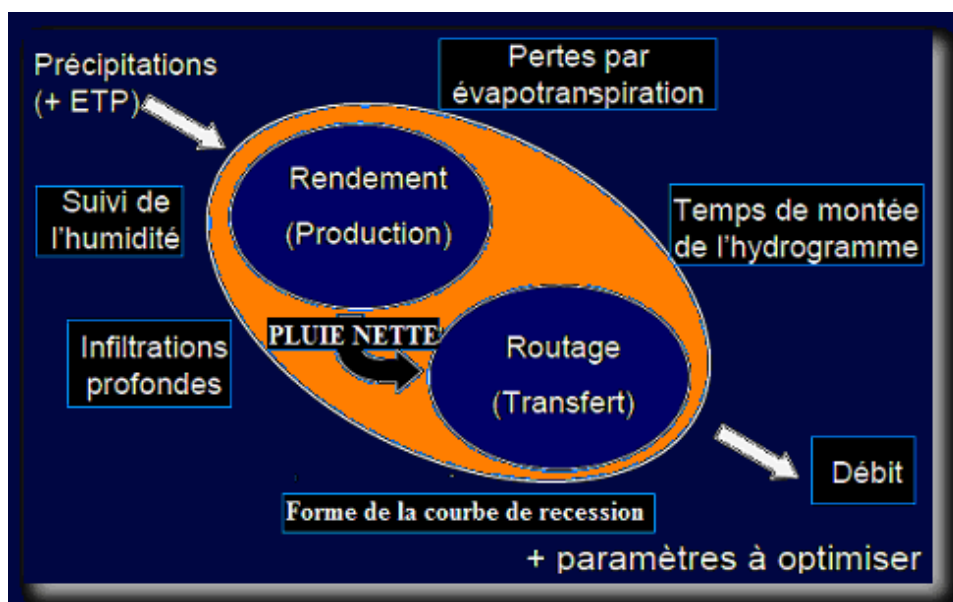


Figure.6 Structure d'un modèle Pluie/Débit d'après Perrin (2000)

http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/schertze/GTESD_CME/GTESD_CME_documents.html#cours2

1-3-1 Fonction de production

On cherche souvent à distinguer la partie de la pluie qui tombe sur le bassin de celle qui va participer effectivement à l'écoulement vers l'exutoire. La fraction de la pluie qui échappe à l'interception et à l'infiltration est appelée « pluie nette ou active ». C'est cette quantité qui va s'écouler et que la fonction de production va évaluer. Quelques fonctions de production souvent utilisées sont rapportées dans le tableau.1 :

METHODES	EQUATIONS	SCHEMAS
SCS ¹	$\frac{F}{S} = \frac{Q(t)}{P(t) - I_a} \text{ où}$ $Q(t) = \frac{(P(t) - 0.2S)^2}{P(t) + 0.8S}$ <p>F : rétention au sol au temps (t), S : rétention maximale potentielle (mm), $Q(t)$: cumul de pluie nette à un instant (mm), $P(t)$: Cumul de pluie brute à un instant t (mm), I_a : les pertes initiales englobant l'évapotranspiration (mm).</p>	
VIC ²	$w_0 = w_0^- - Q_b - e$ <p>w_0 : quantité de stockage possible d'eau, w_0^- : capacité de stockage du sol, Q_b: débit de base, e : évapotranspiration réelle.</p>	
IHACRES ³	$CMD_k = CMD_{k-1} - P_k + E_k + D_k$ <p>P_k Pluie brute E_k Evapotranspiration D_k Drainage CMD_{k-1} Déficit calé au pas de temps précédent</p>	
GR ⁴	$Pr = Perc + (Pn - Ps)$ <p>Pn : Pluie nette, Ps : première estimation de la pluie nette, $Perc$: Percolation issue du réservoir de production.</p>	

Tableau. 1 Récapitulatif des différentes méthodes de calcul de la fonction de production

¹Soil Conservation Service, USDA, 1972)²Variable Infiltration Capacity, Wood et al (1992)³ Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfalls, Evaporation and Streamflow data Jackeman et al (1990)³ Génie Rural, Edijatno and Michel, 1989.

1-3-2 Hydrogramme Unitaire

Sherman (1932), définit l'hydrogramme unitaire HU d'un bassin versant comme un hydrogramme de ruissellement direct résultant d'une pluie nette, uniforme (constante), d'une durée de référence D , suffisamment longue selon Musy (1998) pour générer un écoulement sur l'ensemble du bassin.

L'intérêt de la théorie de Sherman réside dans la linéarité du système qu'elle postule : la réponse à un signal unique est proportionnelle à son intensité et la réponse à plusieurs signaux décalés dans le temps est la somme des réponses aux signaux individuels.

C'est dire que si un hydrogramme unitaire est divisé en k tranches de durée d , le pourcentage du volume total ruisselé dû à chaque tranche est une constante caractéristique du bassin. Un hydrogramme unitaire peut être donné sous une forme discrète par les valeurs de la fraction de pluie qui atteint l'exutoire en fonction du nombre de pas de temps.

$$Q_n = \sum_{i=1}^n P_i U_{n-i+1}$$

où Q_n est le débit à l'instant $n\Delta t$, P_i la pluie entre les instants $i\Delta t$ et $(i+1)\Delta t$ et U_{n-i+1} l'hydrogramme unité au temps $(n-i+1)\Delta t$.

Cependant, pour des raisons théoriques et pour caractériser l'hydrogramme unitaire par un petit nombre de paramètres, il est plus intéressant de considérer des hydrogrammes unitaires générés par un opérateur mathématique ou physique simple : une équation différentielle du premier ordre ou une cascade de réservoirs linéaires.

a- Hydrogramme Unitaire Instantané

L'hydrogramme unitaire instantané suppose que l'averse a une durée infinitésimale. Il représente la réponse du système à une impulsion instantanée. Le produit de convolution linéaire donne l'intégrale, ci-dessous, connu sous l'intégrale de Duhamel:

$$Q(t) = I.A. \int_{\tau=0}^{t=t} U_0(t-\tau).d\tau$$

préserve les hypothèses de linéarité et d'invariance exigées par la théorie de l'hydrogramme unitaire. (Musy, 1998). Dans cette expression, τ est la durée de la pluie, A la surface du bassin versant, I : l'intensité de la pluie, $d\tau$ la durée instantanée et U_0 une averse d'une durée $\tau \longrightarrow 0$

b- Hydrogramme Unitaire Conceptuel

Cet hydrogramme assimile la réponse du bassin versant à une cascade de réservoirs plus ou moins complexes.

c- Hydrogramme Unitaire Géomorphologique (GUH)

Les caractéristiques géomorphologiques d'un bassin versant servent et à décrire son comportement hydrologique et à rendre compte de sa fonction de transfert. . L'hydrogramme unitaire géomorphologique assimile la fonction de transfert à une fonction de distribution de probabilités des temps de parcours, en faisant droit à la linéarité et l'invariance temporelle des phénomènes de transfert. (Rodriguez-Iturbe et Valdès,1979 ; Gupta et al.,1980).

1-4 Mise en œuvre d'un modèle hydrologique

L'application d'un modèle hydrologique se déroule en plusieurs étapes: la première est consacrée aux traitements préliminaires des données, suivie d'une opération d'estimation des paramètres (calage) et en dernier une étape de validation (Musy, 1998).

Nous détaillons ici les deux dernières étapes.

4-1 Calage des paramètres

- L'étape de calage consiste à estimer les paramètres du modèle pour simuler au mieux les réponses observées. Cette estimation s'effectue soit manuellement par essais et erreurs soit automatiquement à l'aide d'un algorithme d'optimisation.

4-2 Validation du modèle

Lors de la validation, le modèle calé est testé pour simuler des événements autres que ceux utilisés lors du calage. L'opération de validation a pour objectifs de (i) vérifier l'adéquation du modèle (ii) estimer l'erreur de calage pour arrêter le choix final des valeurs des paramètres du modèle.

Cette validation est souvent confortée par une analyse de sensibilité du modèle aux paramètres.

4-3 Incertitudes en modélisation hydrologique

Les résultats fournis par un modèle sont liés en grande partie à la qualité des données d'entrées i.e. aux incertitudes qui les affectent. Le recensement des différentes sources d'erreurs (O'Donnell et Canedo, 1980) distingue :

- Les erreurs d'enregistrement ou de représentativité résultant de (i) l'intégration de valeurs ponctuelles (précipitations, infiltration, température ...), (ii) l'estimation indirecte des variables (jaugeages), l'évapotranspiration, ...)
- Incertitudes dues à la structure du modèle conceptuel dont (i) les approximations des processus physiques, les approximations numériques, (ii) le traitement global de processus distribués (capacité d'infiltration), (iii) le traitement séquentiel de processus concomitants ...

- Erreurs de calage dues à la (i) subjectivité de la fonction critère (notamment le critère des moindres carrés face à des modèles non-linéaires), (ii) taille de l'échantillon des données utilisées pour le calage, (iii) la variabilité du calage par rapport à différents échantillons, (iv) critères de convergence en présence de minima locaux.

4-4 Critères d'ajustement

Les critères d'ajustement permettent de juger de l'adéquation entre la chronique observée des débits et celle reproduite par le modèle. Selon l'objectif, ces critères peuvent être calculés sur (i) les débits, (ii) la racine carrée des débits ou (iii) les logarithmes des débits.

- Critère de Nash-Sutcliffe

C'est celui qui est le plus utilisé. Il est donné par l'expression :

$$\text{Nash} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right]$$

où Q_{obs} désigne les débits observés en m^3/s , Q_{calc} , les Débits calculés ou simulés en m^3/s , $\overline{Q_{obs}}$, la moyenne des débits observés en m^3/s et N le nombre de pas de temps sur la période étudiée.

Les valeurs du critère de Nash-Sutcliffe sont comprises entre un et moins l'infini (non borné inférieurement). Un nash négatif signifie que la qualité de la simulation est mauvaise.

- Critère de Nash borné

Il correspond à une transformation du critère de Nash-Sutcliffe. Il s'est avéré performant pour rendre compte de la qualité de la simulation des débits de crues.

$$\text{C2MQ} = 100 * \frac{\text{Nash}(Q)}{200 - \text{Nash}(Q)}$$

L'application des modèles de génie rural (GR) existe depuis les années 80. Ils ont été développés au sein du CEMAGREF-Antony. Leur mise en œuvre a concerné les zones tempérées. Le succès de leurs applications a permis de les développer pour explorer d'autres contextes hydroclimatologiques tels ceux des zones arides et semi-arides.

1-5 Les modèles GR (génie rural)

5-1 Introduction

L'intérêt des modèles GR réside dans leur aptitude à assurer une globalisation du système (Perrin et al. 2007) :

au niveau des processus en utilisant des relations simples à l'échelle du bassin sans liens avec la physique ;

- au niveau spatial en assimilant le bassin comme une entité homogène ;
- au niveau du temps

Les modèles GR ont été développés, comme nous allons le voir, pour des pas de temps variés annuel (GR1A), mensuel (GR2M) et journalier (GR3J et GR4J).

Les dernières générations des modèles GR (GR4j, GR3M, ...etc.) testées en zone semi-aride sur des bassins peu jaugés ont été soumises à plusieurs critiques qui ont permis d'améliorer leurs performances en palliant certaines contraintes par l'intégration de certains facteurs de correction que nous allons développer ultérieurement. La nouvelle génération de modèle GR aborde également les pas de temps horaires Mathevet (2005), Fourmigué et Lavabre (2005).

Nous proposons, ci-dessous, un historique succinct sur l'évolution de ces modèles jusqu'à la mise au point de leur dernière génération.

5-2 Historique

Plusieurs tentatives d'amélioration ont été proposées pour les modèles GR. Les innombrables travaux ont eu lieu en grand partie au groupe CEMAGREF Antony où plusieurs chercheurs ont eu pour objectif de développer ces modèles en les rendant de plus en plus compatibles avec la complexité des hydrosystèmes. Dans l'historique suivant, nous allons retracer l'évolution de ces modèles par les travaux qui ont marqué ce développement. Pour plus de détail, nous pouvons nous référer aux travaux de Perrin (2000), Mouelhi (2003)⁵.

Le premier modèle de la saga GR est une version modifiée du modèle CREC (Cormary et Guilbot, 1973) dont le module de base a été réduit à deux réservoirs paramétrés sur leurs capacités respectives (Michel, 1983). Plus tard, Edijatno (1987, 1991) a modifié la fonction de production de ce modèle référencé GR2 en introduisant un troisième paramètre qui est la constante de temps de l'hydrogramme unitaire. Ce modèle, GR3, a ensuite été amélioré pour appréhender les échanges souterrains via un paramètre. Le nouveau modèle GR4 a conduit, quant à lui, à une meilleure performance que la version antérieure.

La nouvelle version du modèle journalier GR4j est très similaire à la précédente au réservoir de production près et aux minimales modifications qui ont porté sur les fonctions de production. Perrin et al. (2003) améliorent aussi le modèle avec 4 paramètres permettant une progression dans la simulation des étiages. .

⁵ <http://www.cemagref.fr/webgr/Historique.htm>

5-3 Le Modèle GR4j

Ce modèle a connu plusieurs versions proposées successivement par Nascimento (1995), Edijatno *et al.* (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin *et al.* (2003). Le modèle GR4J sera repris en détail dans la partie application. La version discutée ci-dessous est celle de Perrin *et al.* (2003).

Le modèle GR4J dispose de certaines fonctions qui sont communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel.

La figure ci-dessous, illustre le schéma conceptuel du modèle « GR4 » et les quatre paramètres calés. On distingue : la fonction de production, qui permet de calculer la pluie efficace à partir des données journalières de pluie et d'évapotranspiration potentielle grâce à un premier réservoir, et la fonction de transfert qui permet de transformer la pluie efficace en débit. Cette fonction de transfert est composée de deux branches qui se vidangent de manière différente : l'une permet de représenter les écoulements rapides (branche directe), et l'autre qui est à vidange lente puisqu'elle transite par un réservoir linéaire. (Perrin et al (2003) in Ducharme, (2009)). L'utilisation du modèle GR4J requiert pour ses différents calculs les informations suivantes : la superficie du bassin, les chroniques des moyennes journalières des pluies, les chroniques journalières d'ETP et les valeurs des taux de remplissage des deux réservoirs : de production (X_1) et de transfert (X_3).

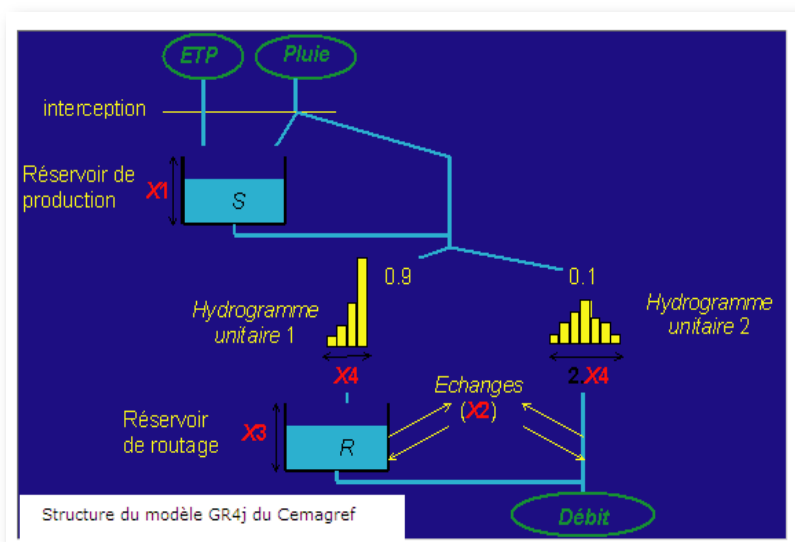


Figure.7 Schéma du modèle GR4J Perrin et al(2003)

a-Description Mathématique

L'expression mathématique des différents fonctions sous GR4j est résumée ci-dessous ;

-La phase d'interception

Cette étape est basé sur la détermination de la pluie nette notée P_n et l'évaporation notée E_n :

$$\begin{array}{ll} \text{Si } P \geq E \text{ alors } P_n = P - E & \text{et } E_n = 0 \\ \text{Si } P \leq E \text{ alors } E_n = E - P & \text{et } P_n = 0 \end{array}$$

- La fonction de production

Cette fonction est exprimée par deux valeurs, la partie de la pluie stockée dans le réservoir notée P_s et le taux d'évaporation réel de l'eau dans le réservoir noté E_s

$$P_s = \frac{A \left[1 - \left[\frac{S}{A} \right]^2 \right]}{1 + \frac{S}{A}} * W \quad \text{avec } w = \tanh \left(\frac{P_n}{A} \right)$$

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{A} \right)}{1 + \left[2 - \frac{S}{A} \right] * V} * V \quad \text{avec } V = \tanh \left(\frac{E_n}{A} \right)$$

Depuis ces équations il en résulte un troisième terme qui est la percolation qui est donnée par :

$$\text{Perc} = S \left[1 - \left[1 + \left(\frac{S}{2.25 A} \right)^{-4} \right] \right]^{-\frac{1}{4}}$$

Cette quantité d'eau est subdivisée en deux parties :

Les 90% ou (0.9) sur le schéma sont transférées par un hydrogramme unitaire, noté HU1 et un réservoir de routage. Les 10% (0.1 sur le schéma) restante sont transférées par un seul hydrogramme noté HU2. Ces deux hydrogrammes caractérisent le paramètre X4 cité plus haut.

Les hydrogrammes sont calculés par le contenu du réservoir noté S :

$$S = S - \text{Perc}$$

Nous aurons par rapport au deux hydrogrammes HU1 ET HU2 la notation suivante : SH1 et SH2

Pour $t < X4$

$$SH1_{(t)} = \left[\frac{t}{X4} \right]^{\frac{5}{2}}$$

Clicours.COM

$$SH2_{(t)} = \frac{1}{2} \left[\frac{t}{X4} \right]^{\frac{5}{2}}$$

Pour $X3 < t < 2 * X4$,

$$SH2_{(t)} = 1 - \frac{1}{2} \left[2 - \frac{t}{X4} \right]^{\frac{5}{2}}$$

$t \geq X4$ $SH1_{(t)} = 1$

$t \geq 2 * X4$ $SH2_{(t)} = 1$

Un échange souterrain est mis en évidence par F qui est déterminé par :

$$F + X2 * \left[\frac{R}{X3} \right]^{\frac{7}{2}}$$

R : représente le niveau d'eau dans le réservoir

Le niveau d'eau dans le réservoir de transfert noté R est mis à jour par l'ajout d'une quantité q9 désignant une sortie d'eau dans l'hydrogramme HU1 qui dépend aussi de l'échange souterrain F, R s'écrit de la forme :

$$R = \max(0; R + Q9 + F)$$

Ce niveau se vidange par la suite sous une forme de sortie Qr :

$$Qr = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3} \right)^4 \right]^{\frac{1}{4}} \right\}$$

Le niveau s'écrit en final :

$$R = R - Qr$$

La deuxième sortie de l'hydrogramme HU2 est soumise aux mêmes conditions d'échange que celle issue de HU1 par contre c'est cette partie qui va définir la composante de l'écoulement Qd

Le débit final du modèle s'écrit de la forme :

$$Q = Qr + Qd$$

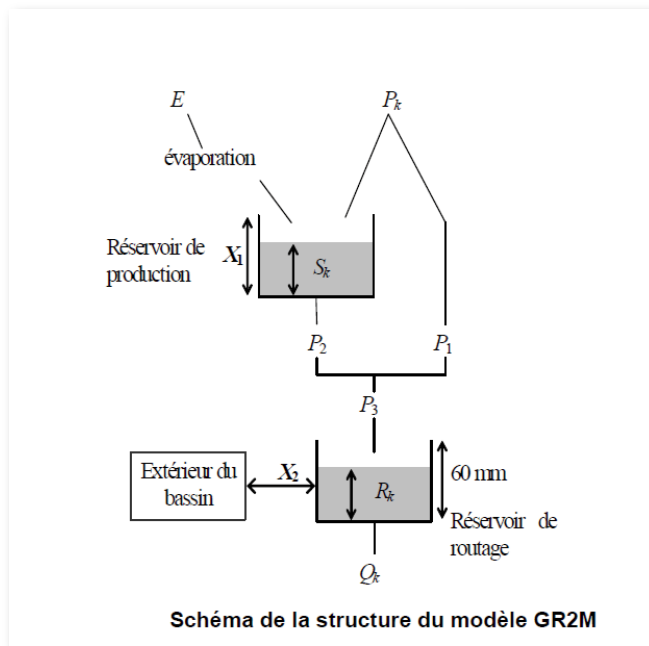
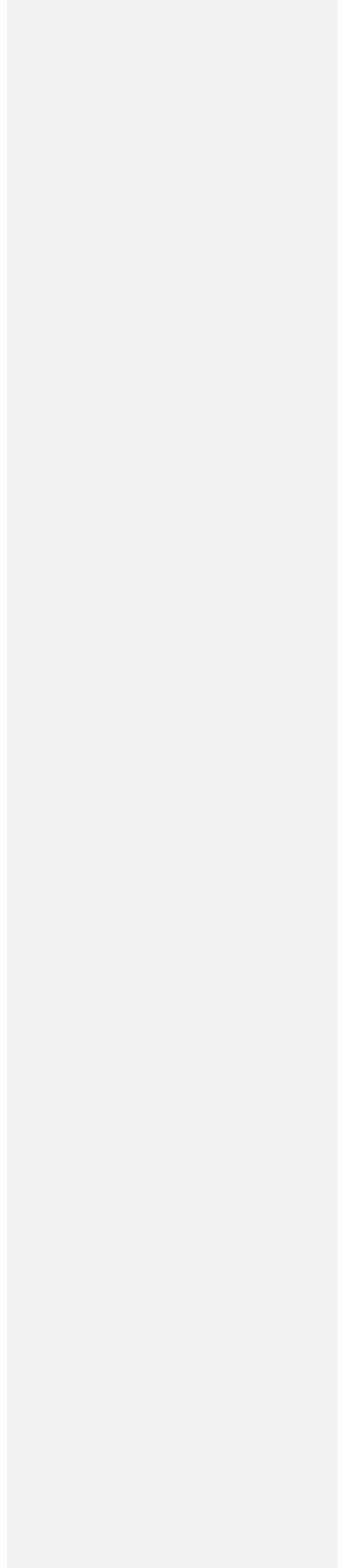


Figure.8 Schéma de la structure du modèle GR2M

1-6 Conclusion de la première partie

La problématique bassins jaugés – bassins peu jaugés (voire non jaugés) a permis de rendre compte de la quête de données pour entreprendre la modélisation d'un versant. avec deux variables de forçages (P , ETP). Cette voie de modélisation explore de nouvelles pistes de recherche où s'élaborent de nouveaux concepts. Tel est le cas du modèle GR4J.

CHAPITRE II



2 Considérations générales du bassin d'étude

Cette partie a pour objet de présenter le contexte général du bassin de la Tafna d'un point de vue géomorphologique, géologique et climatologique.

2- Contexte général du bassin de la Tafna

Le bassin de la Tafna a fait l'objet de nombreux travaux après de nombreux travaux qui ont porté sur sa géologie (Benest, 1987) sur son contexte climatologique (Dekkiche, 2004; Khaldi, 2005) et sur son contexte l'hydrologique de ses cours d'eau (Bouanani, 2004). Nous allons résumer dans ce chapitre ses principales caractéristiques.

2-1 Localisation et cadre général de la zone étudiée

Le bassin de la Tafna est localisé dans la partie nord occidentale de l'Algérie. Dans le découpage du territoire algérien en bassins hydrographiques (Figure.9B), il figure parmi les bassins de l'Oranie-Chott-Chergui entre la latitude $34^{\circ} 5$ et $35^{\circ} 3$ nord et la longitude 1° et 2° ouest. Un tiers de la superficie du bassin est situé en territoire marocain avec Oujda pour chef lieu (Figure.11-A).

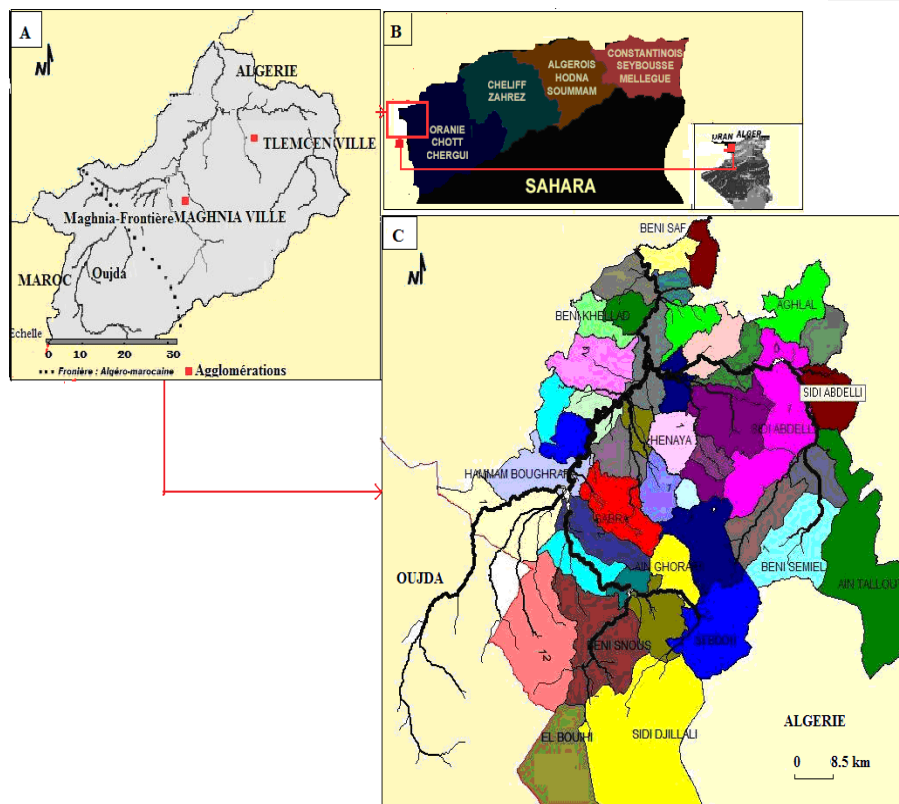


Figure .9 Localisation du secteur d'étude et les communes drainées.

Sa superficie totale est de l'ordre de 7267 km² avec un écoulement avoisinant 335 Hm³/an (http://www.mre.gov.dz/eau/ress_superf.htm).

Le bassin présente un important intérêt socio économique pour la région occidentale de l'Algérie septentrionale. Il assure l'approvisionnement en eau des populations de nombreuses communes (Figure.9 C) et pourvoit aux besoins des secteurs agricoles et industriels, très actifs dans la région (Kettab, 2001). Il contribue aussi aux transferts d'eau à l'intérieur du bassin mais aussi à l'extérieur vers les métropoles d'Oran et d'Ain-Temouchent. Depuis 1991, près de 250.10³m³/j et 18.10³m³/j y ont été transférés (Boudjadja 2003; ABH, 2006 ; Benblidia, 2010). Ces transferts sont effectués à partir de cinq barrages implantés sur les zones amont et centrales du bassin. Le Tableau 2 résume quelques données sur ces barrages ainsi que leur usage.

Barrage	Année mise en service	Capacité initiale hm3	Volume régularisé hm3/an	Affectation
Beni-Bahdel	1952	63,0	48	EP/Agriculture
Meffrouch	1963	15,0	17,0	AEP
Sidi-Abdelli	1988	110,0	50	AEP
Hammam.Boughrara	1999	177,0	59.0	AEP
Sikkak	2004	27,0	25,0	EP/Agriculture

Tableau.2 Caractéristique des cinq barrages du bassin de la Tafna et leur usage A.E.P (Alimentation en eau potable)

La longueur du cours principal de l'oued Tafna a été estimée par nos soins à partir du modèle numérique de terrain du bassin. Elle est de l'ordre de 170 km en territoire algérien. Celle située en territoire marocain a été omise, faute de disposer du MNT de la totalité du bassin. Ses limites sont présentées dans la section II-2. Elles incluent la partie marocaine, représentée par le sous bassin de Mouileh.

L'examen de la figure 9C montre que l'oued Tafna prend naissance au Nord de la ville de Sebdo, au niveau de la source située dans la grotte de Boumaaza. L'oued draine les parties amont du bassin sur une distance d'une dizaine de kilomètres où une partie de ses eaux est stockée dans le barrage de Béni-Bahdel. L'oued continue ensuite son cours vers les parties centrales du bassin en traversant les monts de Tlemcen et la plaine de Maghnia où les eaux sont collectées dans le barrage de Hammam Boughrara. Une seconde branche alimente l'oued Tafna, il s'agit en l'occurrence de l'oued Mouileh dont le parcours fait un détour en territoire marocain puis reviens sur le territoire algérien pour rejoindre son cours vers la plaine de Remchi. Où une autre branche très importante des oueds Sikkak et Isser se rencontrent et alimentent le barrage de Sikkak. Enfin de parcours l'oued Tafna débouche à la plage de Rechgoune (région de Béni- Saf).

Seuls les grands affluents de la Tafna sont permanents. Ce sont (i) l'Oued Mouileh au niveau de la frontière algéro-marocaine (ii) l'Oued Khémis et l'Oued Sebdou ou appelé encore oued Béni-Bahdel dans la partie sud ouest (iii) l'Oued Boukiou dans la partie centrale et (iv) l'Oued Sikkak et Isser dans sa partie orientale.

Dans le cas présent et compte tenu de la disponibilité des données, nous avons retenu comme objet d'étude les sous bassins suivants (Figure. 12)

1) sous bassin de Khémis, **2)** sous bassin de Béni-Bahdel ou de Sebdou, **3)** sous bassin de Mouileh, **4)** sous bassins de Sikkak, **5)** sous bassin contrôlé par la station de Zenata pour les quelles une station pluviométrique et une station hydrométrique étaient disponibles (Figure.12). Ces systèmes vont être développés ultérieurement.

2-2 Données et critiques

a- Données hydrométriques et pluviométriques

**Présentation*

Les sous-bassins étudiés disposent chacun d'une station hydrométrique et d'une station pluviométrique contrôlant les flux entrants et les flux sortants. Ces chroniques proviennent de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) d'Oran. Ce sont des séries journalières courant sur une période de 31 ans (1975-2006). Ces stations sont celles de Béni-Bahdel, Khemis, Maghnia-frontière, Zenata et Sikkak. On dispose là de 5x2 stations, cinq pluviométriques et cinq hydrométriques. Nous n'avons pu disposer des données de la station Pierre du chat, située à l'embouchure de la Tafna. Leur fiabilité contestable et contestée les a exclues de cet examen.

**Prétraitement statistique*

Les données pluviométriques utilisées présentent peu de lacunes. En revanche, il y avait des lacunes dans 20% des stations hydrométriques. Aussi, nous avons retenu la plus longue période commune aux 5 stations i.e. 1975-2006. Les données manquantes ont été complées par la moyenne mensuelle interannuelle lorsque les analyses le nécessitaient. C'était le cas pour l'établissement des bilans mensuels et annuels.

Les chroniques ont été soumises à des examens préalables des statistiques descriptives comparaison des moyennes avec des études antérieures comme celles de Bouanani(2004), Dekkiche (2004), .. . Nous avons utilisé comme référence la station de Khemis, dont la fiabilité a été reconnue par Khaldi (2005). Par ailleurs, la mise en œuvre du modèle GR4J (Perrin et *al.* 2003) nous a interpellé sur quelques points qui nous ont permis de détecter des incohérences entre les données de pluies et de débits considérées conjointement (par exemple quantité de précipitations très faible donnant un pic de crue sur la courbe des débits observés) . Ces incohérences ont été corrigées en examinant les sources originales des données (archives, papiers, ...).

A noter aussi, que les stations Béni-Bahdel et Khemis se situent en amont des barrages qu'elles contrôlent. Cette situation les exempts de toutes influences induites par ces infrastructures.

b- Prétraitement des données altimétriques***Modèle Numérique de Terrain (MNT) et structuration du réseau hydrographique:**

Pour les besoins du modèle de GR4J, nous avons utilisé le MNT de la figure 11. Ce MNT a été obtenu à l'issue de (i) la numérisation des courbes de niveau au terme de la digitalisation des sous-bassins de Khemis, et Mouileh entreprise pour bien délimiter le bassin au niveau de la frontière algéro-marocaine (ii) l'extraction du réseau hydrographique à partir d'une première numérisation du chevelu hydrographique effectuée sur la base des courbes de niveau digitalisées et co-référencées à une image du MNT de la Tafna fournie par le Centre National de Télédétection Spatiale Oran-Arzew "CNTS".

Une deuxième source de données utilisée est celle de la Shuttle Radar Topography Mission⁶ dont le MNT à 3" d'arc a été reprojeté en Lambert algérien et traité avec le logiciel HydroDem (Leblois, 2008) pour en extraire le réseau hydrographique.

La confrontation entre les deux réseaux a permis d'éliminer les artefacts du réseau hydrographique finalement utilisé. Les superficies du bassin et celles de ses sous-bassins ont été déterminées avec une résolution de 200 m.

1- MNT du bassin de la Tafna

La représentation du bassin avec le modèle numérique de terrain ainsi élaboré, permet une représentation plus complète du bassin de la Tafna et une délimitation plus précise du contour du bassin.

Sur cette base, la superficie du bassin délimité par le MNT est à 7278, le périmètre est 531 km. Le nombre total des cours d'eau évalués après l'extraction du réseau hydrographique est de 2159 thalwegs avec une longueur totale de 4833 km.

Nous avons procédé aussi au calcul de quelques caractéristiques morphométriques par digitalisation manuelle :

A l'échelle de tout le bassin, ces caractéristiques sont à l'issue des valeurs locales des sous bassins

2-Coefficient de Gravelius

L'indice de compacité permet l'évaluation globale de la longueur du réseau hydrographique. Le principe de cet indice consiste à comparer le périmètre d'un bassin versant à celui d'un cercle de même surface. Plus le bassin est compact, plus sa forme est ramassée, plus l'indice de Gravelius est faible et plus le temps de circulation des eaux jusqu'à l'exutoire est court d'où une possibilité évidente de risque de crues.

La compacité du bassin versant de la Tafna a été évaluée par le coefficient de Gravelius donné par le rapport suivant:

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

P: périmètre du bassin en km

A: Superficie du bassin en km²

⁶ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

A la base des documents cartographiques utilisées Hubert (2002), le coefficient de compacité pour le bassin de la Tafna est égal à $K_c = 1,94$ caractéristique d'une tendance à une forme assez allongée.

3-Rectangle équivalent

Il représente la transformation géométrique dans laquelle le contour du bassin versant devient un rectangle de même périmètre et de même superficie que le bassin versant. Les dimensions du rectangle équivalent sont calculées à partir des mesures du périmètre, de la surface et de l'indice de compacité K_c du bassin selon les formules suivantes :

$$L, l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} * \left(1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right) \text{ Si } K_c \geq 1,12$$

L: Longueur du rectangle équivalent en km.

l: Largeur du rectangle équivalent en km

Les dimensions du rectangle équivalent pour le bassin de la Tafna donnent:

$$L = 235 \text{ km et la largeur } l = 30,92 \text{ km}$$

4-Densité de drainage

La densité de drainage notée D_d caractérise le chevelu hydrographique. Elle se définit, par le rapport de la somme de la longueur moyenne par km^2 de l'ensemble des talwegs L_n et de la superficie A du bassin. Elle est exprimée par la formule suivante:

$$D_d = \frac{\sum L_n}{a}$$

L_n : longueur totale des cours d'eau.

a: Superficie totale du bassin versant en km^2

$$D_d (\text{bassin de la Tafna}) = 0,67$$

La valeur de la densité de drainage renseigne sur le degré de développement des talwegs en rapport avec la géologie. Elle est importante quand la surface du sol est constituée par des formations géologiques imperméables et vice versa Dubreuil et al (1975).

5-Rapport des longueurs

a-Rapport de confluence

Ce rapport est obtenu en dénombrant les ordres des cours d'eau dans un réseau hydrographique. L'ordre est défini comme la confluence d'un cours d'eau. Selon Strahler (1952), trois cas peuvent être distingués :

- *Tout cours d'eau n'ayant pas de confluence en amont est d'ordre 1
- * Deux cours d'eau d'ordre n confluent en un ordre n+1
- *Deux cours d'eau d'ordre n+1 et un autre d'ordre n confluent en un ordre supérieur

Le rapport de confluence est un nombre sans dimension. Son principe consiste à dénombrer tous les segments de même ordre. Il est exprimé par la formule, ci-après:

$$Rc = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$

N_n : Nombre de tronçons d'ordre N

N_{n+1} : Nombre de tronçons d'ordre N + 1

Rc (bassin de la Tafna)= 1,85

b-Rapport des longueurs

Il est représenté par le rapport des longueurs moyennes des cours d'eau d'ordre L_{n+1} par ceux d'ordre L_n :

$$L = \frac{\overline{L}_{n+1}}{\overline{L}_n}$$

\overline{L}_{n+1} Longueur moyenne d'ordre N + 1

\overline{L}_n Longueur moyenne d'ordre N

Les résultats sont reportés sur le tableau, ci-après;

Ordres	Nn	Rc	Ln	$\overline{L}_n \left(\frac{L_n}{N_n} \right)$	n+1	L
1	6923		2625	0,38		
2	3041	2,28	1095	0,36	2,40	6,66
3	1416	2,15	497,2	0,35	2,20	6,27
4	715	1,98	281,1	0,39	1,77	4,50
5	533	1,34	190,3	0,36	1,48	4,14
6	383	1,39	104,6	0,27	1,82	6,66
7	197	1,94	40,6	0,21	2,58	12,50

Tableau.3 Récapitulatif des paramètres morphométriques calculés au niveau du bassin de la Tafna.

2-3 Géomorphologie

La géomorphologie du bassin de la Tafna selon Benest(1986) est très affectée par l'orographie globalement contrastée qui caractérise l'Algérie (Figure.10). La séparation entre le domaine septentrionale et la plate forme saharienne est liée à la présence de deux chaînes montagneuses : l'atlas Tellien et l'atlas Saharien orientés sensiblement SW-NE. Ces deux ensembles sont séparés par un domaine de hautes plaines et de hauts plateaux

(Guardia, 1975). Le bassin de la Tafna s'insère dans une zone du domaine tellien entourée, au Nord, par les monts des Traras et Sebâa-Chioukh. Ce sont des reliefs d'altitude dépassant les (>1000m) avec une structure issue des mouvements alpins. A l'Est et au Sud-est, les monts de Tlemcen représentent les reliefs les plus importants du bassin. L'altitude peut y dépasser 1800 m. Au Sud-ouest, les monts de Ghar-Roubane constituent la terminaison occidentale des monts de Tlemcen au niveau de la frontière algéro-marocaine (Benest et al (1987). La plaine de Maghnia est la plus étendue des plaines du bassin. Elle correspond à une zone d'effondrement dont la superficie avoisine les 52 km². Elle est formée essentiellement par des dépôts alluvionnaires issus du passage de l'oued Tafna (Elmi ,1972) ; Mekahli, 1988)

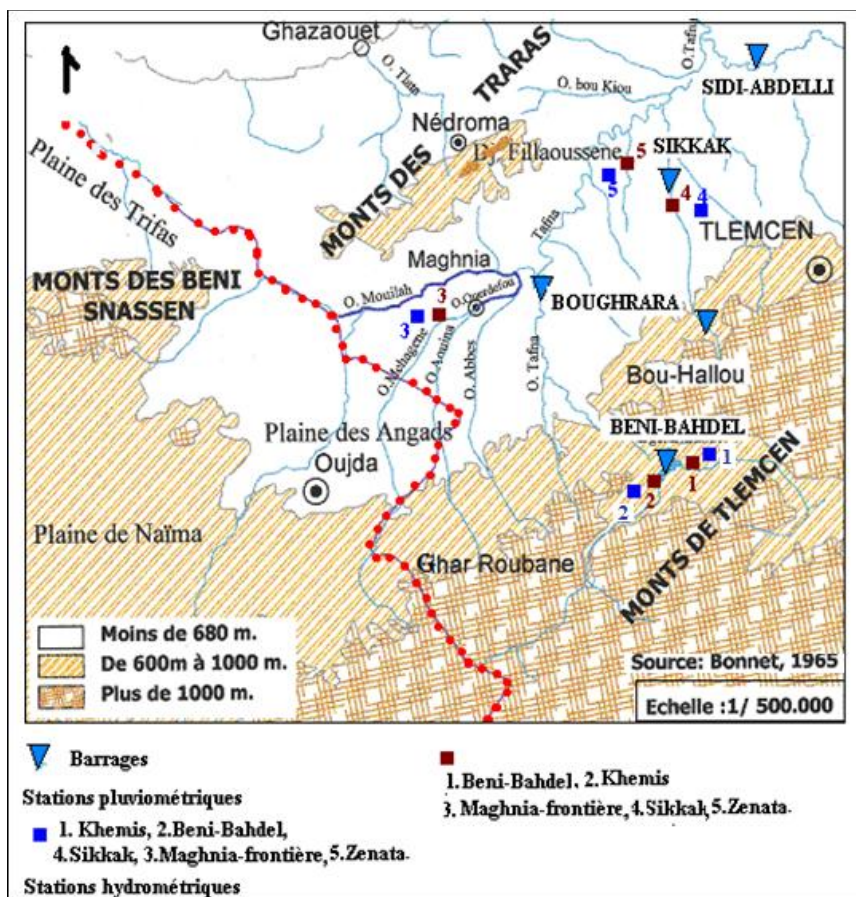


Figure. 10 Carte de la disposition des différents reliefs dans la région de la Tafna (Bonnet, 1965) et des principaux points de mesures cités.

Cet aspect morpho-structural contrasté du bassin est à l'origine d'une subdivision de trois zones (Benest, 1990) (i) la zone de la haute Tafna (ii) la zone de la moyenne Tafna et la zone de la basse Tafna. Cette subdivision est la plus couramment utilisée.

L'examen du MNT de la Figure.11 rend compte de la variation de la dénivelé et de la pente des parties citées, ci-dessus.

De ce point de vu, le bassin de la Tafna apparait comme représenté par des altitudes variables parfois même très abruptes. Les plus importantes se concentrent au niveau des zones hautes telles celles des sous bassin de Khémis et de Béni-Bahdel (> 1000 m). A contrario, dans la partie centrale se trouvent les parties les plus planes avec des altitudes qui avoisinent 200 m. Les pentes moyennes varient entre 60% et 80% pour la haute Tafna et atteignent les 10%; vers la basse Tafna et 40% pour la moyenne Tafna.

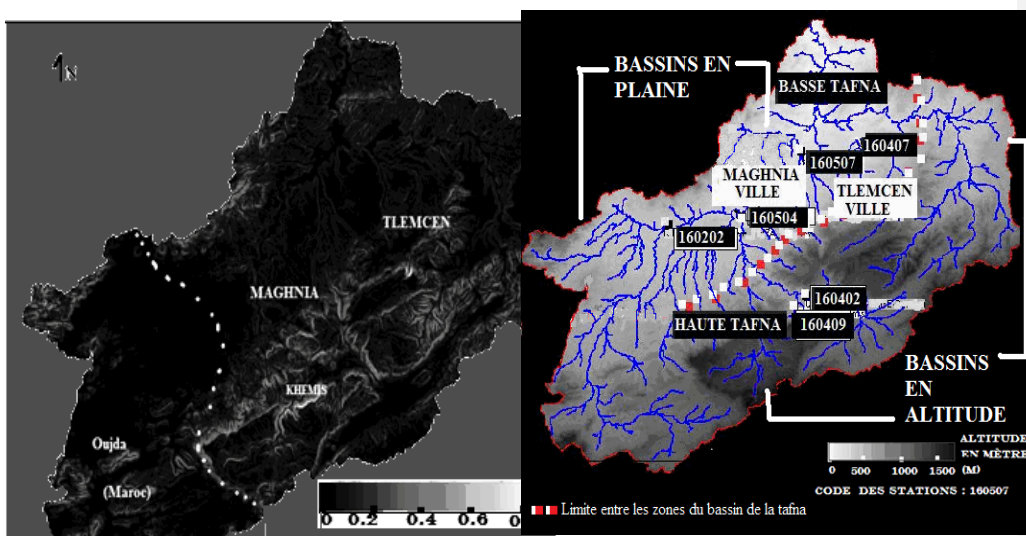


Figure.11 Géomorphologie du bassin de la Tafna.

à gauche carte des pentes (%), à droite topographie du bassin et réseau de thalwegs

L'analyse des débits et des précipitations (Bakreti et al.2013) qui y a été entreprise montre qu'une subdivision du bassin en deux ensembles est suffisante pour rendre compte de la variabilité de la distribution des écoulements dans le bassin.

La première entité regroupe les sous-bassins de plaine ou de moyenne altitude Alors que la seconde englobe celles des sous-bassins présentant des altitudes élevées sur une partie de leur surface. Nous parlerons néanmoins par commodité de langage de bassins en altitude dans la suite de ce document (Figure 12).

1-Zones en altitude

Les sous-bassins de cette zone ont une altitude variant entre 1000 à 1800 mètres avec On trouve les sous-bassins de Khemis et Béni-Bahdel ou Sebdou.

a-Sous bassins de Khemis

Le bassin de Khémis représente la partie amont la plus élevée de la Tafna dont l'altitude oscille entre les 1000-1800 m. Ce bassin occupe une superficie de 343 km² sur un périmètre de 93 km. Le bassin est caractérisé par la présence de reliefs très contrastés et des pentes très fortes favorisant l'accentuation de son potentiel érosif.

b-Sous bassin de Béni Bahdel appelé parfois de Sebdou

La superficie du bassin que nous avons étudié par la station hydrométrique de Béni Bahdel couvre une superficie de 603 km². Cette aire dépasse largement la superficie attribuée habituellement au bassin de Sebdou ce qui donne à penser que la délimitation réelle du bassin pose question comme cela est établi par le MNT. Ce sous bassin est caractérisé par la présence de zones de horsts dont l'altitude dépasse les 1110 m et par des fossés d'effondrement correspondant à la zone dite effondrée de Sebdou où l'altitude avoisine les 850 m. l'état érosif du bassin s'apparente relativement à celui du bassin de Khemis avec une tendance vers l'équilibre.

c-Sous bassin de Sikkak

Ce bassin occupe une superficie de 320 km² sur un périmètre de 116 km. Il est drainé par l'oued Sikkak qui traverse la région d'Ain Youcef à proximité de la ville de Tlemcen. L'oued Sikkak représente le branchement oriental de la grande artère de l'oued Tafna. La confluence de l'oued Sikkak avec la Tafna s'effectue au niveau de la région de Remchi. Ce bassin évolue en l'état de vieillesse avec un potentiel érosif très faible. Il semble que d'importants volumes y sont déversées il est qui a été signalée par plusieurs auteurs dans la région de Tlemcen.

2-Zones de plaine

Les sous-bassins représentant cette région ont une altitude moyenne qui peut atteindre les 300-400m. Cette zone englobe le sous-bassin de Mouileh, le sous-bassin contrôlé par la station de Zenata et le bassin de Sikkak.

a-Sous bassin de Mouileh

Ce bassin qui débord la frontière algérienne occupe une superficie de 1819 km² sur un périmètre de 230 km. Il est caractérisé par : 1) une faible topographie avoisinant les 200 à 300 mètres, 2) Les zones de plaines où prédomine la plaine de Maghnia,3) les faibles pentes (<10%) et son faible potentiel érosif.

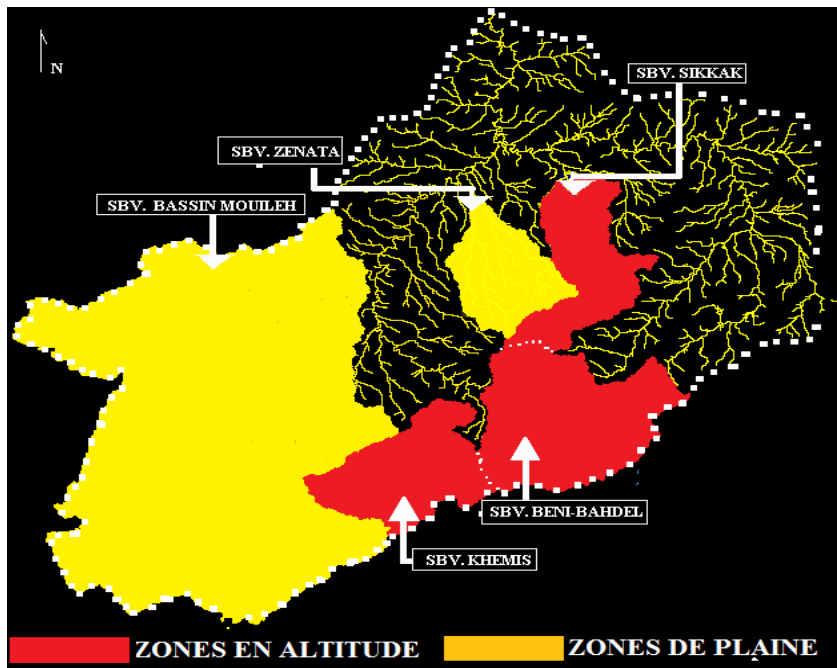


Figure. 12 Emplacements des sous bassins étudiés

b-Bassin contrôlé par la station hydrométrique de Zenata

Ce bassin de plaine couvre une superficie de 236 km². Il a été délimité par le modèle numérique de terrain sous Hydrodem permet de délimiter son vers l'exutoire au niveau de la plage de Rechgoune.

2-4 Géologie

La géologie du bassin de la Tafna a été étudiée dans une série de travaux qui ont débuté par les travaux de Gentil (1903) et ont continué avec Elmi (1972), Benest(1986), Collignon (1986 et 1993),.... Ces travaux ont contribué à l'identification des grands ensembles stratigraphiques avec lesquels il a été possible de retracer l'histoire géologique de la région ainsi que sa structure. Le bassin de la Tafna est caractérisé par l'abondance de deux faciès, le premier carbonaté d'âge secondaire dominant le secteur d'étude et le second marneux du Miocène moins abondant. (Benest, 1986), Figures 13 et 14

Les formations carbonatées sont représentées par des calcaires et des dolomies très karstifiées qui donnent une certaine spécificité à cette partie de l'ouest algérien. Le bassin de la Tafna dispose d'une structure contrastée, qui se manifeste tantôt par des reliefs abrupts et tantôt par des zones de plaines ou des fossés d'effondrement. Les faciès carbonatés sont localisés principalement dans deux parties : au Nord du bassin dans les monts des Traras et à Djebel Fellaoucène et dans la partie Sud au niveau de la région Khémis, Sikkak et de Sebdou. Le Miocène occupe pour sa part, le domaine des plaines. Ses dépôts surmontent initialement les formations carbonatées mais le plus souvent, on les retrouve sous les

massifs calcaires à la suite de la tectonique intense qui a affecté la région. Une structure y est sous forme de horst et de grabens avec des rejets des failles pouvant atteindre les 1000 m. Figure.13 A et B (Benest, 1986)

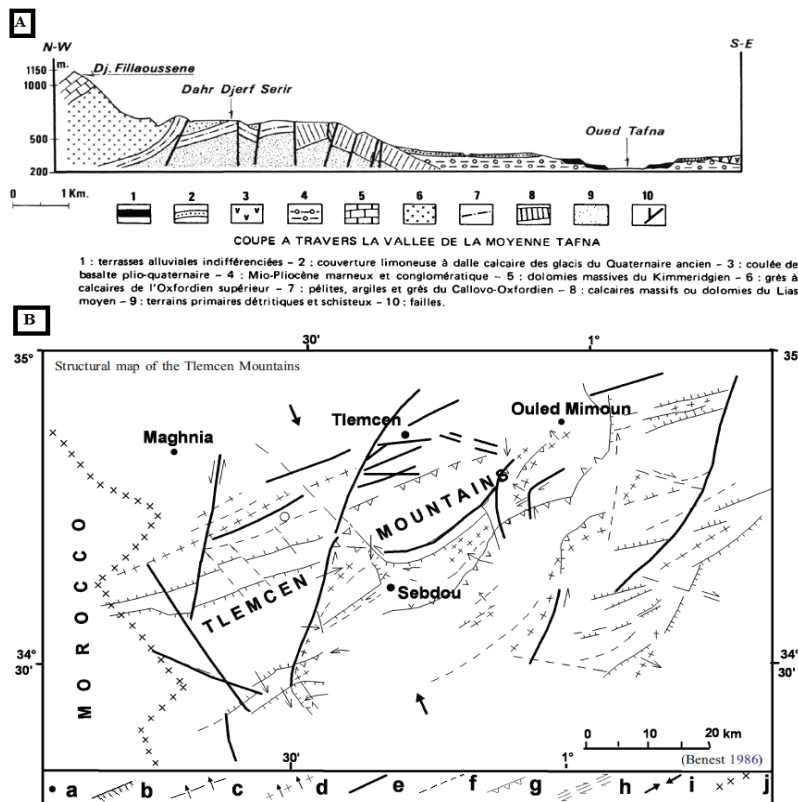


Figure. 13 : A) Coupe géologique à travers la vallée de la moyenne Tafna. In (Aimé et al. 1988) B) Extrait de carte structurale Bonnet(1967) in Azzaz(2008)

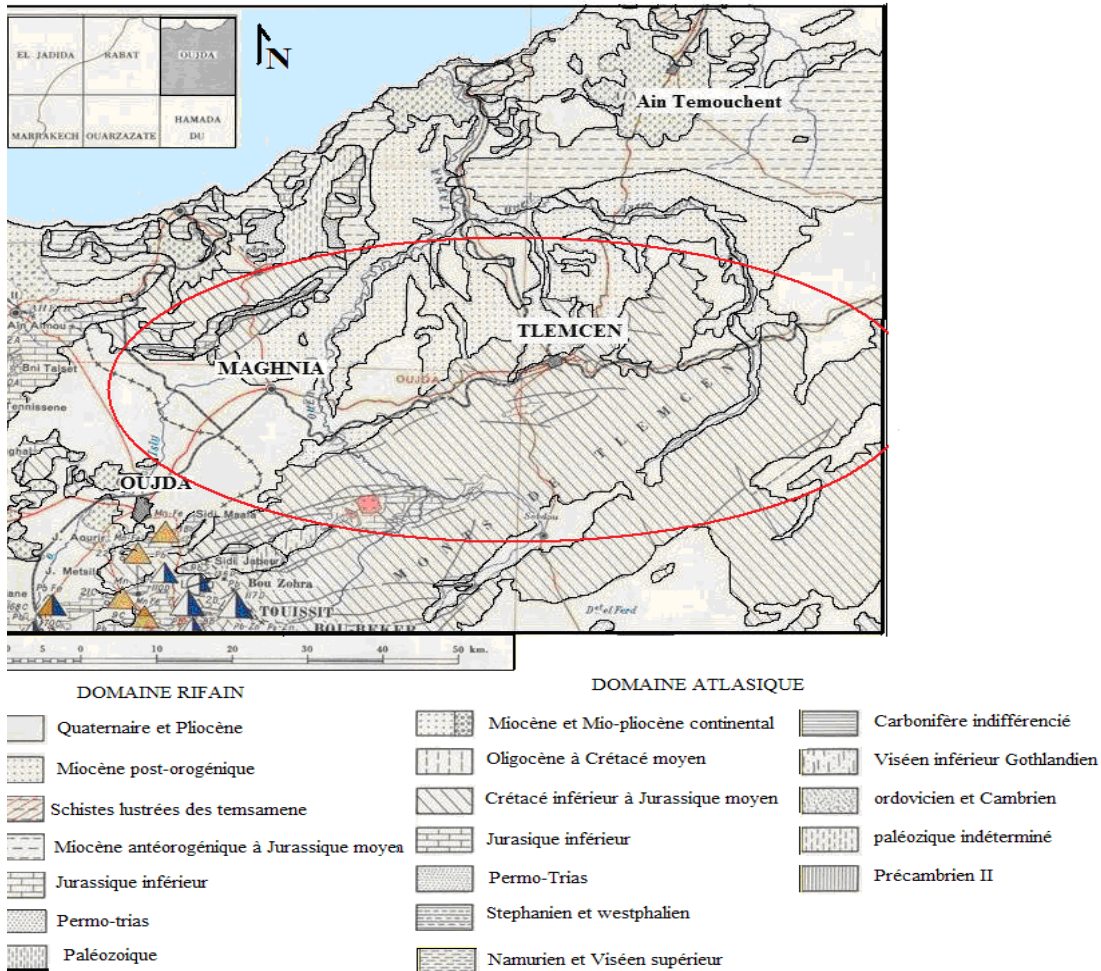


Figure. 14 Extrait de la carte géologique d'Oujda au 1/500000°
<http://www.tvciencia.pt/cat/pagcat/icat03.asp?varcota=CDI-6292-1969>

La série stratigraphique du bassin de la Tafna a été étudiée par plusieurs auteurs et reprise dans plusieurs travaux : Elmi (1972), Mekahli (1988),... Dans le paragraphe suivant nous allons présenter un résumé non exhaustif des principaux affleurements pouvant avoir un intérêt pour notre étude. (Figure.15 et 16)

La série stratigraphique comporte les ensembles suivants:

1- Le Primaire

Il est représenté par des formations schisto-quartziques d'âge Silurien à Dévonien. Ces niveaux forment les noyaux des plissements et affleurent au niveau des monts de Ghar-Roubane, au sud du village de Khemis.

2- Le Secondaire

Il débute à la base avec les formations dites d'argiles de Saida qui sont attribuées au Callovo-Oxfordien dont l'épaisseur peut dépasser les 300 mètres. Ces dernières sont surmontées par les grès de Boumediene d'âge Oxfordien-inférieur/Kimméridgien-supérieur. Le faciès correspond à des grès à ciment calcaire intercalés par des fines couches argileuses. Leur épaisseur peut atteindre les 500 m. Les formations qui leur succèdent sont appelées les calcaires de Zarifet qui sont d'âge kimméridgien. Leur épaisseur est d'environ 25 m. La série continue avec des formations dites des dolomies de Tlemcen très abondantes dans le bassin de la Tafna. Ces formations dolomitiques très karstifiées peuvent atteindre une épaisseur de 300 m. Un autre cortège de formations vient surmonter ces dolomies, il s'agit, en premier, des niveaux marno-calcaires dits de Raourai, puis les calcaires du lato suivi des dolomies de Terni d'âge Tithonique inférieur et coiffé par les marno-calcaires d'Hariga attribués au Tithonique supérieur.

3- Le Crétacé

Il est représenté par les argiles de Lamoricière et le grès de Berthelot affleurant dans la région de Sebdou.

4- Le Tertiaire

Il est représenté par :

-Le Miocène inférieur (Burdigalien) qui est représenté par deux niveaux :

La base est formée par des poudingues très durs associés à des blocs de calcaires dolomitiques à ciment calcaire-gréseux. La partie supérieure est constituée par des argiles marneuses de 100 m d'épaisseur. Ces ensembles ont été localisés entre la vallée de l'oued Zitoun et le Djebel Fillaoucène qui se trouvent au nord du bassin étudié.

-Le Miocène moyen ou Serravallien : repose en discordance sur le Miocène inférieur. Il est formé par une série d'argiles marneuses d'une puissance pouvant atteindre les 300m. Ces formations se concentrent dans les parties centrales du bassin.

-Le Miocène supérieur ou Tortonien : il s'agit des dépôts de grès jaunes peu consolidés atteignant 20 à 30m d'épaisseur. Ces dépôts surmontent le plus souvent les marnes serravalliennes mais il arrive qu'elles puissent se déposer directement sur le Jurassique comme c'est le cas dans le sous bassin de Mouileh.

5- Le Plio-Quaternaire

Cette formation est composée par une série de dépôts discontinus formés par des éléments hétérogènes. On trouve les faciès suivants : - Des marnes parfois très épaisses prédominant la plaine de Maghnia. - Des limons, sables et graviers récents qui s'étendent entre l'oued Mehaguène et la partie NE de la frontière algéro-marocaine.

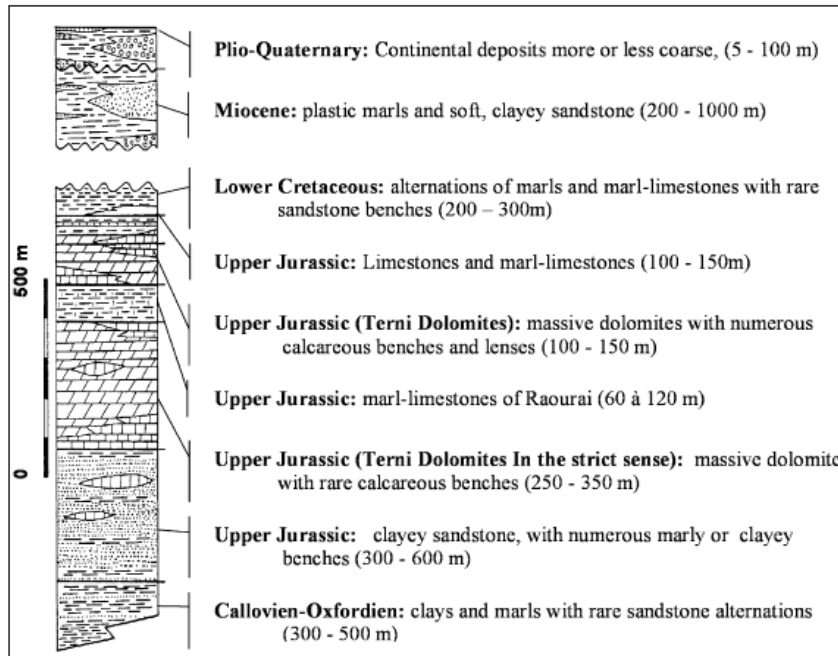


Figure. 15 Log stratigraphique des différentes formations géologiques dans le bassin de la Tafna Benest (1986)

2-5 Hydrogéologie

La structure et la nature lithologique des formations géologiques constituant le bassin de la Tafna ont permis d'individualiser plusieurs types d'aquifères.

On retrouve (figure 16a)

1-Les aquifères de type phréatique caractérisant les formations poreuses (gréseuses) occupant des zones restreintes dans le bassin étudié. **2-**Les aquifères karstiques le plus souvent perchés dominant les zones de reliefs (Khemis, Tlemcen, Sebdou). **3-**Les aquifères captifs représentés aussi par les formations carbonatées mais qui passent en profondeur sous les marnes du Sérvallien.

L'abondance des failles dans le secteur d'étude serait la cause principale du compartimentage des différents systèmes aquifères et la première source aussi des différentes résurgences existant dans le bassin de la Tafna. Ces accidents tectoniques sont aussi responsables de la distribution spatialement hétérogène de la majorité de ces systèmes.

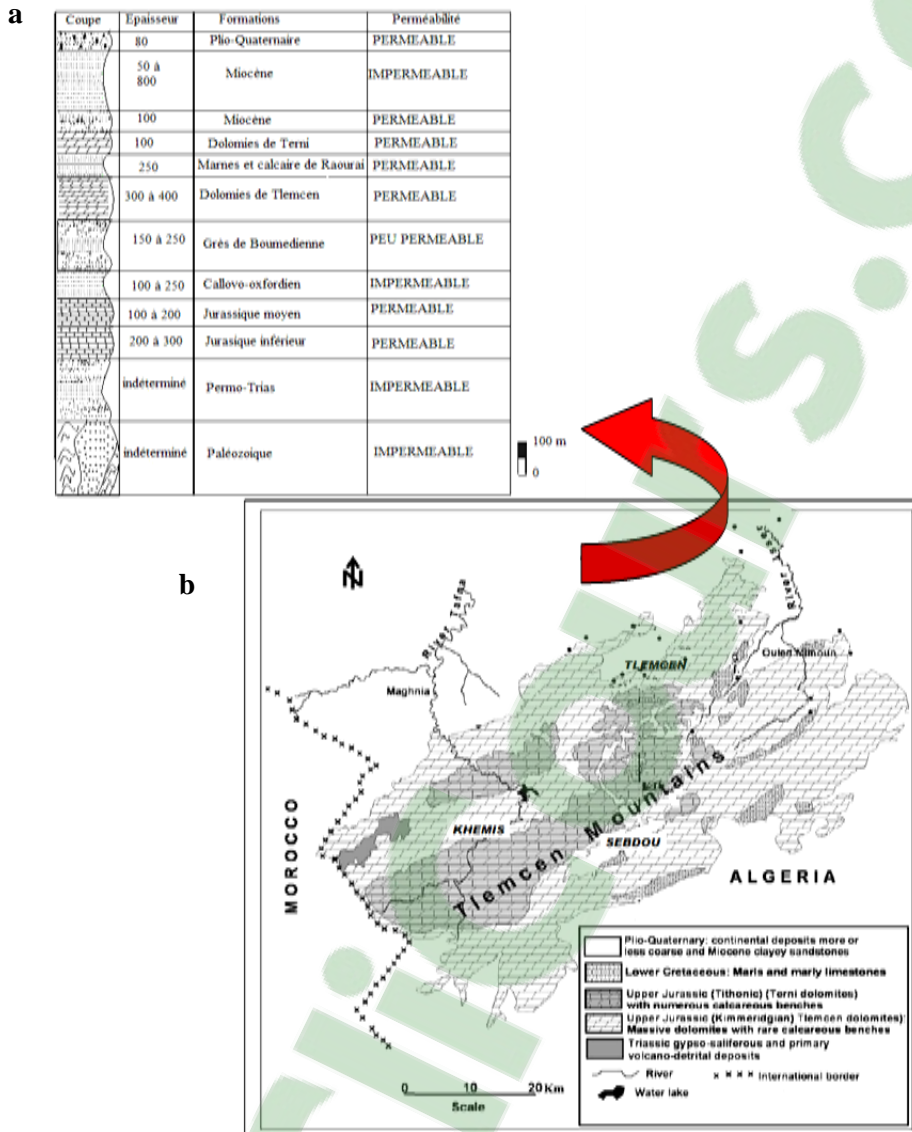


Figure. 16(a, b) Log hydrogéologique et carte de répartition du faciès carbonaté dans le bassin de la Tafna Collignon (1986) cité par Azzaz et al. (2008).

La plus grande concentration des formations perméables fortement karstifiées se localise principalement au niveau des sous bassins de la haute Tafna (Figure 16b) : Khemis, Sebdou ou Béni-Bahdel avec plus de 85%. Les autres formations peu perméables avec absence ou peu de karstification occupent presque 78% de la plaine de Maghnia, Zenata (Azzaz et al. 2008).

La répartition des sols dans le bassin de la Tafna semble très dépendante de la nature lithologique des affleurements dominant les parties du bassin. Au niveau de la haute Tafna ce sont les sols calcaires qui abondent avec la présence des terra rossa ou les argiles de décalcification qui favorisent parfois le développement des couverts forestiers comme au niveau du bassin de Béni-Bahdel ou encore des cultures extensives très importantes au niveau du bassin de Sikkak. Les parties en plaine telles celles du sous bassin de Mouileh, sont constituées de sols marneux, caillouteux parfois argileux. Le couvert végétal y est très peu développé, les terres dénudées sont présentes en fort pourcentage occupant presque la moitié de la superficie de ce bassin (Bouanani, 2004)

2-6 Aperçu climatique de la zone d'étude

Nous avons effectué une recherche bibliographique très large et une analyse pour l'étude du climat en Algérie. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux grandes tendances à la sécheresse de la partie ouest qui nous intéresse. Nous rapportons dans ce chapitre que les grands traits du climat du secteur étudié. Les détails en seront discutés dans le chapitre III. Il en ressort que plusieurs facteurs sont responsables du cadre climatique actuel qui prédomine dans en Algérie. Relevant que le relief a tendance à y augmenter de l'ouest en l'est. Les parties orientales sont les zones les plus arrosées du pays (Figure.17). En revanche, la zone occidentale est caractérisée par des reliefs moins importants en altitude. Les perturbations se trouvent piéger entre les massifs côtiers algériens et la chaîne du Rif.

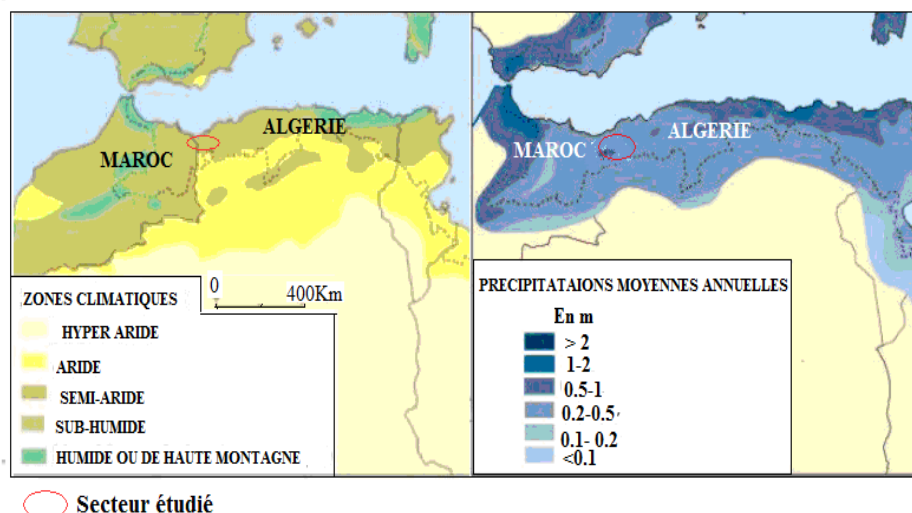


Figure.17 Climat général du secteur étudié

http://www.planbleu.org/donnees/eau/simed/eau_simed_bassin_versant.html

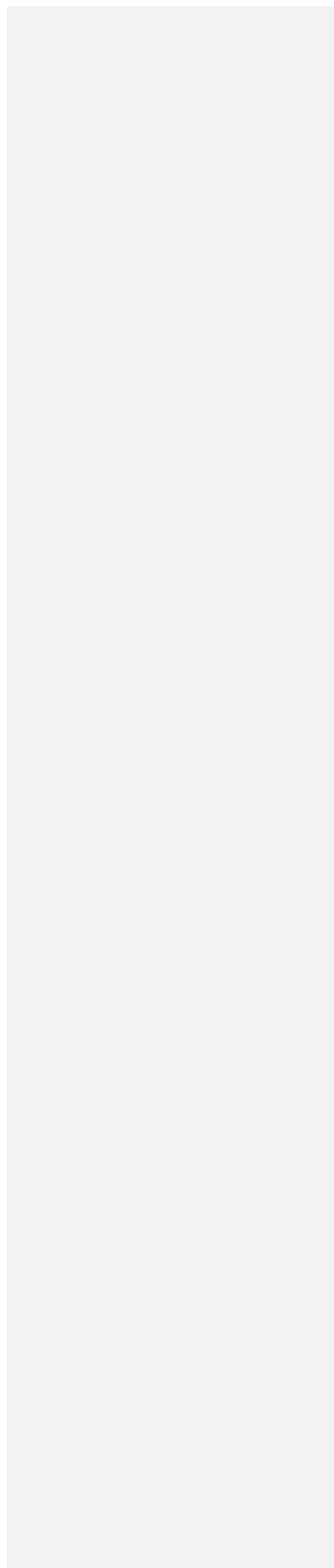
Le climat du secteur d'étude est de type semi-aride avec un été très chaud et sec et un hiver froid et pluvieux parfois neigeux. Les apports pluvieux du bassin sont élevés en printemps et moindres en hiver. En été (Juin à Septembre), les précipitations sont quasi nulles (Meddi & Hubert, 2003). C'est la période la plus sévère en étiage. Les précipitations du bassin de la Tafna sont inégalement réparties : les zones les plus arrosées sont les bassins en altitude avec 400mm et les bassins en plaine sont les moins arrosés avec une moyenne inférieure à 300 mm. L'irrégularité des précipitations, la forte évaporation et les périodes neigeuses épisodiques sont les caractéristiques du bassin de la Tafna.

1-7 CONCLUSION

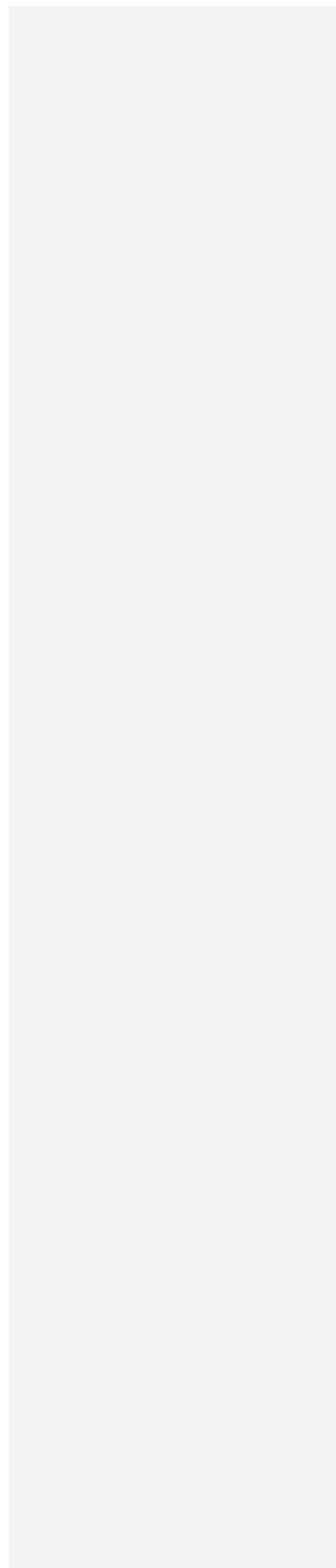
Nous avons essayé, dans ce chapitre, de mettre en évidence quelques caractéristiques physiographiques spécifiques au bassin de la Tafna que nous avons pu calculer en exploitant les données issues du MNT généré. Nous avons aussi donné ses caractéristiques géologiques et hydrogéologiques pouvant modifier ou accentuer l'écoulement de l'Oued Tafna surtout puisque sa partie centrale est constituée par des faciès imperméables et peu de végétation pouvant amortir la vitesse de ses écoulements. La complexité de ce système, signalée par plusieurs chercheurs, rend certaines études très délicates. Il reste, cependant, un modèle très original parmi les bassins semi-arides algériens qui sont très peu étudiés dans le domaine de la modélisation hydrologique suite à sa complexité structurelle (que nous avons présentée) à laquelle s'ajoute la faible densité de ses réseaux de mesures (hydrométriques et pluviométriques). Quelle serait le type de modélisation le plus adapté à notre bassin ? et quelles seront les contrariétés mises en jeu les plus influentes sur ses réponses voire sur son fonctionnement global ?

Ce sont des questions que nous nous sommes posées et qu'on va tenter d'y répondre dans les sections suivantes.

DEUXIEME PARTIE



CHAPITRE III



3 METHODES DE CRITIQUE ET ANALYSE CONJOINTE DES REGIMES PLUVIOMETRIQUES ET HYDROLOGIQUES DANS LE BASSIN DE LA TAFNA

Nous discutons dans ce chapitre, la fiabilité de l'ensemble des données recueillies pour notre étude. Cette discussion inclut en grande partie l'analyse et le contrôle des données. Nous y exposons les principales méthodes adoptées et les techniques de correction appliquées. Ce chapitre inclut aussi une importante section sur l'analyse des écoulements dans le bassin étudié suivie d'un examen sur les tendances et ruptures que nous avons recherchées sur les données collectées. Cette partie d'analyse des écoulements reprend le contenu d'un article accepté dans Hydrological Sciences Journal et propose quelques compléments. Les mesures de base utilisées sont des chroniques de pluies, de débits à pas de temps journalier couvrant une période de 31 ans 1975-2006.

3-1 Introduction et objectifs de cette partie

La question de l'évaluation de la ressource en eau superficielle du bassin de la Tafna revêt une importance particulière. Elle amène à s'interroger à la fois sur les régimes hydrologiques et leurs évolutions au cours du temps.

Le comportement irrégulier en terme de précipitations et d'écoulement dans le bassin de la Tafna a retenu l'attention de plusieurs auteurs et la nôtre. En effet, on enregistre, dans certains des sous-bassins, des réponses uniquement pendant les périodes pluvieuses, alors que d'autres parties continuent à maintenir un écoulement pendant les saisons les plus sèches (Bouanani 2004). Le bassin de la Tafna est considéré comme un bassin semi-aride (Boudjadja 2003) et représente même la partie du pays la plus fragilisée par la sécheresse (Meddi et Hubert 2003). L'irrégularité du régime des pluies et leur distribution spatio-temporelle a été mise en évidence par les travaux de Meddi *et al.* (2007), Meddi et Hubert 2003, Rapport FAO 2008. Ces travaux ont eu pour objet l'évaluation de la ressource en eau et la proposition de certaines solutions pour faire face à tous les problèmes de gestion de cette denrée. D'autres études ont présenté la distribution spatiale des précipitations à travers des cartes (Mebarki 2003) élaborées en fonction de l'influence du relief comme la méthode "Pluvia" Meddi *et al.* (2007). Les études sur les écoulements ont, quant à elles, été le plus souvent axées sur l'évaluation des débits solides Ghenim *et al.* (2008), Bouanani 2004, Yebdri *et al.* (2007) puisque le bassin de la Tafna est le siège de l'implantation de 5 barrages dont l'efficacité est amoindrie par les matières solides transportées lors des crues (car le bassin de la Tafna est, comme toute la zone semi-aride du Maghreb, affecté par des périodes de sécheresses mais aussi par des périodes de crues). Ces matériaux peuvent menacer la longévité de ces structures Ghenim *et al.* (2001).

Les régimes des écoulements dans le bassin de la Tafna ont été analysés par plusieurs auteurs (Adjim (2004), Bouanani (2004) et Dekkiche(2004)...). L'irrégularité et l'hétérogénéité spatiale des régimes pluviométriques ont souvent été mises en avant comme étant la cause principale de la variation de l'écoulement dans le bassin de la Tafna. Dans

une analyse de tendance sur des séries de pluies annuelles algériennes, Meddi *et al.* (2010) mettent en évidence des tendances à la baisse pour deux stations situées dans le bassin de la Tafna (Lalla-Setti(~Sikkak) et Beni-Bahdel). Leur étude portait sur la période (1950-2004) et une rupture significative dans les séries était détectée à partir des années 1975. Les travaux sur l'analyse des débits se sont surtout concentrés sur les écoulements moyens annuels ou mensuels et les crues (e.g. Bouanani 2004) mais la période étudiée s'arrête en 1998. En revanche, nous n'avons pas trouvé de travaux s'intéressant aux écoulements de base, qui revêtent une grande importance pour la gestion de la ressource en eau, en soutenant des débits dans les cours d'eau sur une partie de l'année. Par ailleurs, ces écoulements de base sont susceptibles d'être affectés de manière plus directe par l'impact des activités humaines. Il nous a donc paru intéressant de nous interroger sur d'autres causes possibles de variabilité des écoulements dans le bassin versant de la Tafna. Nous proposons pour cela l'analyse des écoulements de base et du Base Flow Index (BFI) dont nous essaierons de relier la variabilité à la lithologie et à la topographie. Par ailleurs, les études entreprises jusqu'à ce jour sur les stations hydrométriques du bassin de la Tafna, utilisaient des données non actualisées (e.g. Bouanani 2004) alors que des analyses de tendances n'avaient été réalisées que sur les données pluviométriques Meddi *et al.* (2010). A travers ce chapitre nous allons pouvoir présenter une analyse conjointe des séries de débit et de pluviométrie ainsi que les tendances/ruptures pouvant les affecter.

3-2 La mesure en hydrologie

La chaîne d'acquisition de la donnée reste à priori faussée par les différentes sources d'erreurs que nous allons signaler non exhaustivement Bois *et al.*(1975). Il est nécessaire de procéder à la critique de la donnée avant toute utilisation même pour une simple étude de statistique descriptive, comme l'affirme L'Hôte (1986). Cette analyse de contrôle permet d'identifier les valeurs anormales, de les corriger et de valider leur exactitude pour les placer dans le fichier de base opérationnel. Selon les objectifs de l'étude, si on se focalise sur le thème de la modélisation, comme c'est le cas de notre étude, ce contrôle va demander d'autant plus de rigueur que le modèle hydrologique à mettre en place. L'application du modèle exige une analyse fine du couple pluie/débit puisque ces données vont être utilisées comme valeurs de référence et seront intégrées dans le calcul, par exemple, des bilans hydrologiques (Beaulieu, 2009). Ceci dit, les résultats attendus seront à priori conditionnés par le degré d'exactitude des données recueillies (Renard, 2006).

3-3 L'utilité de la critique de données

La mesure en hydrologie constitue la connaissance de base. Son acquisition représente l'étape la plus sensible sur laquelle repose la qualité de l'ensemble des analyses ultérieures (Renard, 2006 ; Bois *et al.*, 2007). Il est important de signaler que malgré toutes les précautions prises lors de la mesure (in situ), il arrive que certaines erreurs puissent affecter les chroniques. Plusieurs auteurs classent ces erreurs en deux catégories (Bois *et al.* (2007), Morell *et al.* (2008),...), suivantes:

1- Erreurs aléatoires qui influent particulièrement la précision de la donnée. Elles sont principalement liées à la surévaluation ou la sousévaluation de la valeur obtenue par rapport à la valeur réelle. Comme par exemple suite à une mauvaise lecture de la mesure dû

à un report accidentel soit de décalages en jours, ou par un déplacement de la virgule pendant la saisie des valeurs enregistrées, ...

2- Erreurs systématiques qui affectent principalement la fiabilité de la mesure. Elles résultent d'une surévaluation ou sous évaluation permanente de la valeur mesurée. Ce cas est rencontré quand il s'agit d'un déplacement de la station, d'une défaillance technique due à la détérioration de l'appareillage ou du changement de l'environnement de la station de mesure, sans que ces états soient mentionnés dans les documents de suivi. Dubreuil (1974) explique que le fait de ne pas mentionner toute manipulation à laquelle la station a été sujette peut nuire à la fiabilité de la donnée ce qui conduit aux problèmes d' incohérences ou d'homogénéité .

Notre recherche bibliographique nous a montré que la plupart des études, quand elles abordent la partie critique des données, commencent par la recherche de l'homogénéité. Cette étape essentielle consiste à examiner la stationnarité du phénomène étudié en recherchant à montrer que les caractéristiques de la série chronologique étudiée n'évoluent pas dans le temps et gardent une certaine stabilité (Beaulieu, 2009). Cette étape s'effectue sur deux niveaux par rapport à :

1) *La donnée*: on recherche à déterminer si les mesures appartiennent bien à une même population et ne proviennent pas de plusieurs échantillons.

2) *La station* : on choisit une station repère considérée comme étant correcte et prise comme une référence à condition que son homogénéité ait déjà été validée par des études antérieures. Cette station nous servira à comparer la fiabilité des autres stations dont les mesures sont douteuses en respectant, toutefois le critère de proximité spatiale.

Une autre particularité caractérisant l'utilité de la recherche de l'homogénéité est mise en évidence par Bois (2000) et Bois *et al.* (2007). Ils affirment que lorsque les problèmes systématiques tels que défaillances techniques d'une station et/ou changement d'emplacement sont écartés, la détection d'une non homogénéité peut être la conséquence de l'effet de changement d'un phénomène. Effectivement, bien qu'on s'intéresse à la mesure, ce sont, en réalité, les processus qui sont dissimulés par l'inhomogénéité qui sont les plus importants à rechercher, comme par exemple, celui du changement climatique.

Par ailleurs, nous maintenons que cette étape est décisive pour toute utilisation ultérieure, et conditionne la fiabilité des analyses qui en seront déduites.

1- Choix des stations

Avant de se lancer dans l'étape du choix des stations pluviométriques et/ ou hydrométriques, nous nous sommes fixés deux critères de sélection. Le premier consiste à n'accepter que les stations ayant des chroniques couvrant de longues périodes, une durée minimale de 30 ans a été jugée acceptable, dans notre cas, pour assurer un processus de calage/validation "satisfaisant" du modèle hydrologique envisagé mais aussi pour permettre d'effectuer des analyses de tendance (Renard, 2006). Le second critère consiste à ne prendre en considération que les séries comportant un minimum de lacunes.

Après un long examen des différentes stations existantes dans le bassin, nous avons fait les constatations suivantes : la plupart des stations implantées dans le bassin étudié ne présentaient pas des séries continues dans le temps. Cet état, concerne essentiellement un

nombre important de stations pluviométriques antérieures à l'année 1962 et avec un degré moindre les stations de jaugeages. Ceci peut être relié à l'histoire de la gestion du bassin qui, après 1962 (année de l'indépendance), a connu plusieurs périodes de changement allant vers une diminution d'un nombre de plus en plus important de stations de mesures.

Les anciennes stations pluviométriques et/ou hydrométriques ont été soit endommagées (vieilles des équipements), soit malheureusement détruites par des actes malveillants (les événements de 1991) ou plus récemment immergées par les barrages postérieurement construits (station hydrométrique de sidi Belkheir immergée en 1998 par les eaux du barrage de Boughrara).

De nouveaux projets ont été approuvés par l'état algérien vers la fin des années 90 qui ont eu pour objectif de relancer la mise en place d'une nouvelle génération de stations pluviométriques (Dakkiche, 2004). Mais, ce réseau récent ne répond pas à notre critère de "longue durée", d'autant plus que ces stations ont aussi été installées dans de nouveaux emplacements. Elles vont donc subir l'influence du changement de l'environnement, ce qui va nous confronter encore une fois à un autre problème celui des séries fragmentaires.

Compte tenu des conditions de sélection que nous nous sommes imposées, la seule issue qui nous restait pour un choix définitif et fiable des stations a été de rechercher les stations implantées dans les anciens barrages ou à proximité. Le bassin de la Tafna comporte 5 barrages que nous avons énumérés dans la section II. Ces infrastructures nécessitant un suivi continu et relativement rigoureux nous ont paru les endroits les plus favorables pour une collecte "relativement correcte" des mesures. Selon la localisation des barrages qui couvrent les différentes parties du bassin, la répartition des stations choisies est illustrée sur la figure. 18, ci-dessous;

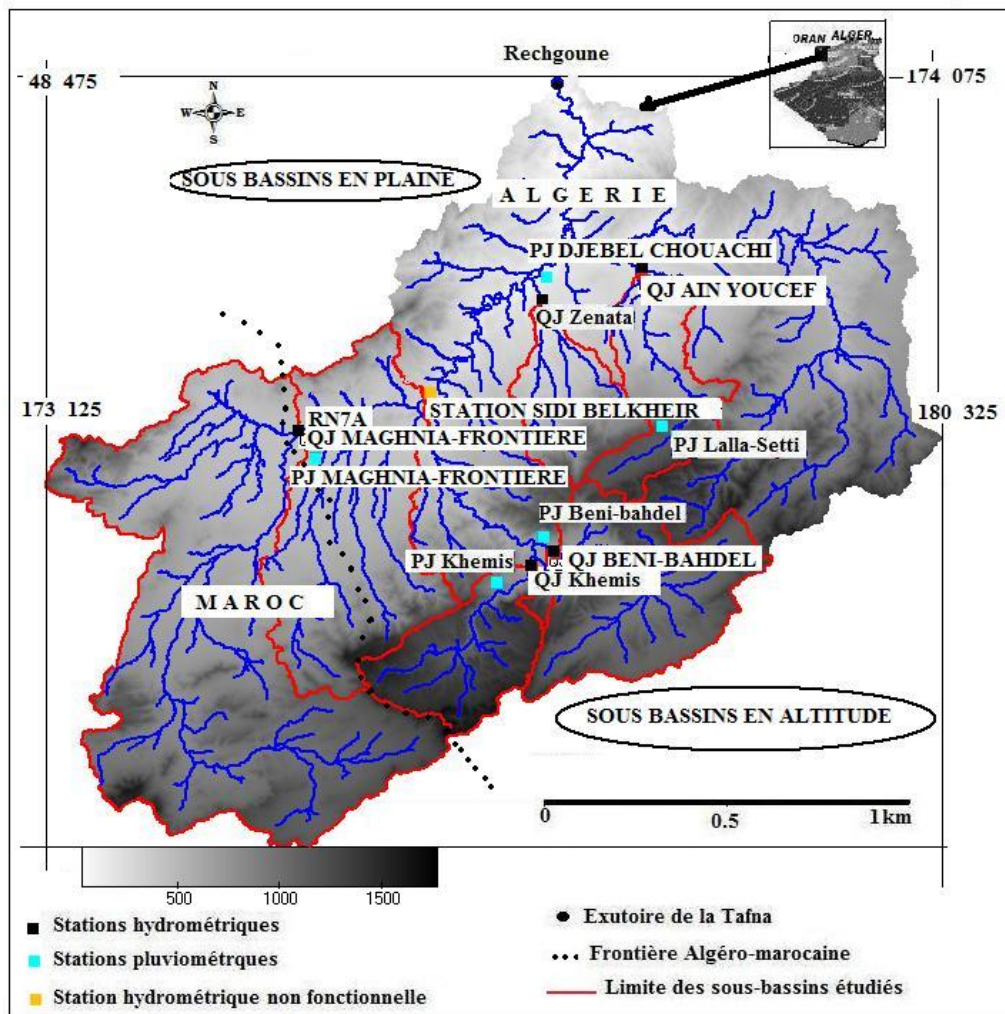


Figure. 18 Répartition des stations pluviométriques et hydrométriques retenues dans la zone étudiée.

Les données pluviométriques et hydrométriques que nous avons recueillies couvrent la période [1976-2006]⁷ et ont été fournies par l'Agence des Ressources d'Hydrauliques d'Oran "ANRH". Nous avons utilisé volontairement la station de Sidi-Belkheir à nos séries pour évaluer l'influence du barrage mais, nous ne l'avons pas intégrée dans toute

⁷ Les chroniques débits/pluies utilisées couvrent la période [09/1975- 09/2006], ce qui correspond à 31 années hydrologiques complètes. Par commodité, nous considérerons qu'une année, par exemple 1976 correspond à l'année hydrologique 1975-1976.

l'étude ; sa période couvre une durée plus courte [1976-1989]. Les caractéristiques des stations sont résumées dans les tableaux, ci-dessous;

Stations pluviométriques	Altitudes Codes		Durée (an)	Coordonnées (Lambert algérien)	
				X (km)	Y (km)
1) Beni-Bahdel	160403	650	31	115,20	165,5
2) Khemis	160406	870	31	109,3	157,1
3) Maghnia-Frontière ou RN7A	160302	430	31	88,8	177,2
4) Dj-Chouachi (~ Zenata)	160518	110	31	118,90	202,9
5) Lalla-Setti (~Sikkak)	160705	1007	31	133,9	181,80

Tableau. 4 Données des pluies

Stations _hydrométriques	Codes	Altitudes (m)	Durée (an)	Superficie (km ²)	Coordonnées (Lambert algérien)	
					X (km)	Y (km)
1) Beni-Bahdel	160402	665	31	603	118,80	163,400
2) Khemis	160409	760	31	343	114,65	161,5
3) Maghnia-Frontière ou RN7A	160202	420	31	1819	83,5	182,4
4) Zenata	160507	205	31	236	120,15	194,60
5) Ain-Youcef (Sikkak)	160504	210	31	320	131,7	201,7

Tableau. 5 Données des débits

Les chroniques représentent des séries journalières prises sur une période de 31 ans pour les stations de Béni-Bahdel, Khemis, Maghnia-frontière, Zenata, Sikkak, soit 10 stations en tout. Nous avons aussi pu obtenir une série de température moyenne journalière collectée à la station de Maghnia [X 177200, Y 88800, Z 395] sur la période 1977-2004 soit une série légèrement plus courte que les séries de pluies ou de débits. Cette chronique nous a servi au calcul de l'ETP que nous avons utilisé dans la partie modélisation.

Nous avons essayé d'obtenir avec la disponibilité des stations une couverture spatiale maximale des surfaces des sous systèmes les plus productifs du bassin de la Tafna. Par ailleurs, il serait utile de signaler que la surface du bassin étant importante par rapport au nombre de stations qui le contrôlent, le réseau reste insuffisant pour en appréhender le fonctionnement en détail d'où notre emploi du qualificatif de "peu jaugé" à notre bassin. Durant toute l'étude, nous avons essayé de travailler avec le peu de mesures que nous avons pu collecter en essayant d'adapter le modèle hydrologique envisagé à ce cadre précaire.

2- Quelle serait la technique de correction adaptée pour notre cas d'étude ?

Nous avons été confrontés, lors de la collecte et l'examen préliminaires des données brutes, à plusieurs problèmes d'incohérence. C'est pourquoi nous avons subdivisé notre discussion sur le prétraitement des données en deux étapes:

L'analyse préliminaire a mis en évidence des erreurs flagrantes, la première sélection de chroniques de pluies et de débits présentait de nombreuses anomalies. Nous avons trouvé, par exemple, des mois de novembre avec 31 jours sur plusieurs chroniques, soit une mesure supplémentaire dans toutes les séries. Il existait aussi des mois de février avec des enregistrements de 30 mesures et des décalages entre les jours et les mois dans une même série d'une même année, dû sûrement à un recollage erroné. Ce dernier problème a été le plus sensible et le plus grave. Il a fallu rechercher et déceler ces différents décalages temporels. Un algorithme de calcul d'erreur a été proposé à cet effet par Leblois dans un travail personnel.

Le modèle est basé sur des corrélations de poste à poste à travers lequel des similitudes entre les pluviomètres ont été mises en évidence. Plus ces similitudes sont fortes plus le coefficient de corrélation est important. L'idée de la rectification est de rechercher l'erreur à travers un système de 04 erreurs envisagées (détail en annexe):

*A partir d'une date t_0 , les valeurs du pluviomètre P_i sont notées trop tôt

*A partir d'une date t_0 , les valeurs du pluviomètre P_i sont notées trop tard.

*Jusqu'à une date t_0 , les valeurs du pluviomètre P_i sont notées trop tôt

*Jusqu'à une date t_0 , les valeurs du pluviomètre P_i sont notées trop tard

A partir de 03 boucles imbriquées sur t_0 , sur P_i et sur le type d'erreur. On recherche toutes les possibilités de corrections qui maximiseraient la mesure empirique de cohérence. Le modèle a mis en exergue que certaines paires de pluviomètres étaient sans période d'observation commune, et propose des corrections pouvant apporter et que le gain global de cohérence était considérable.

Le modèle nous a bien aidé à identifier tous les décalages mais, sans pouvoir les corriger. Il a fallu recourir aux données des archives et à la sollicitation des personnes des services concernés pour récupérer les données correctes mais, il reste, cependant, un bon moyen de diagnostic pour repérer tout décalage accidentel.

Une deuxième série de mesures de débits et de pluies a été collectée. Les décalages aberrants ont été corrigés, les mesures ajoutées accidentellement par les opérateurs ont été supprimées (les mois de février à 30 jours). Nous avons par la suite tenté de vérifier ces nouvelles chroniques en procédant à une représentation graphique simple, les débits et ou les précipitations en fonction du temps (Figure.19). Cette opération nous a permis d'identifier sur les chroniques de pluies des valeurs négatives (-999 parfois -100) utilisées le plus souvent pour remplacer les données lacunaires ce qui correspond à une situation habituelle mais ne correspondant pas toujours à la valeur déclarée pour l'encodage de lacunes. Pour les chroniques de débits, les séries choisies étaient plus complètes avec peu de lacunes. La figure.20, ci-dessous, illustre la disponibilité des séries de débits utilisées.

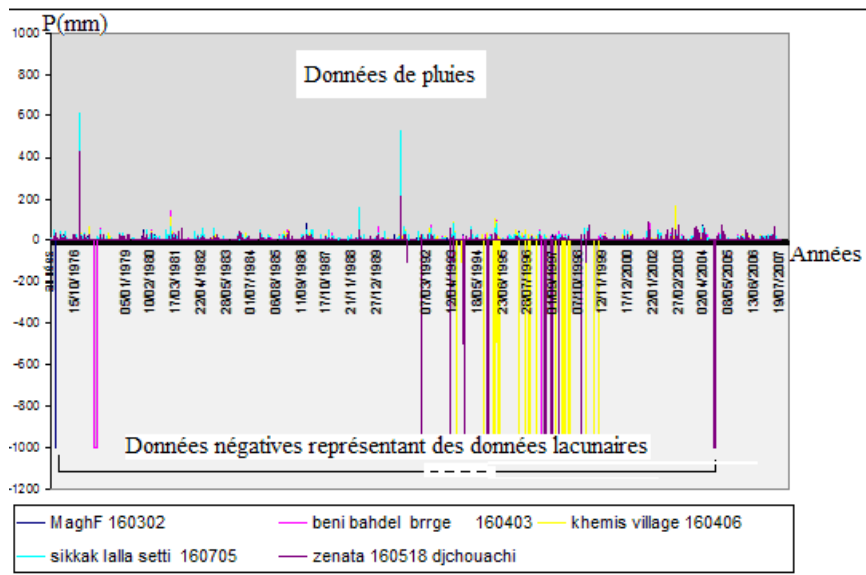


Figure.19 Détection des valeurs aberrantes dans les chroniques journalières de pluies

STATIONS	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
Maghnia-Frontière	[Solid black bar]						
Béni-Bahdel	[Solid black bar]						
Khemis	[Solid black bar]						
Ain-Youcef	[Solid black bar]						
Zenata	[Solid black bar]						
Sidi-Belkheir	[Solid black bar]			[Blank]			

Figure.20 Disponibilité des chroniques de débits (les lacunes apparaissent en blanc)

Pour bien visualiser la continuité des chroniques de pluie, nous avons substitué toutes les valeurs négatives dans les chroniques de pluies par des vides (voir disponibilité des données sur la Figure.20)

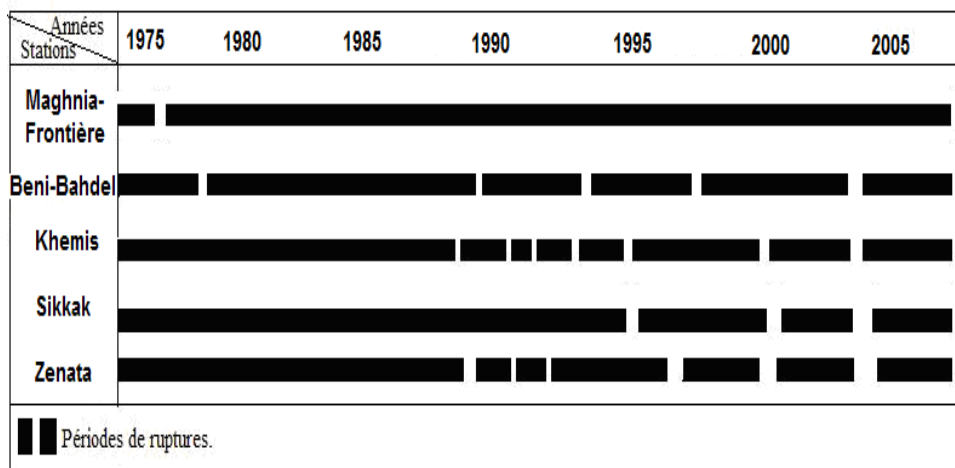


Figure.21 Disponibilité des chroniques de pluie (les lacunes apparaissent en blanc)

La figure, ci-dessus, montre que les lacunes pour les séries de pluies sont plus importantes vers les années les plus récentes. Il est possible que ceci soit la conséquence des événements politiques que le pays a connus vers les années 1991-1992, comme nous l'avons déjà signalé où l'accès à la plupart des barrages ou stations situés principalement en altitude, était très difficile voire impossible. Parfois les conditions météorologiques ne permettent pas non plus l'accès aux stations le plus souvent bloquées par la neige, comme par exemple à Tlemcen, Khemis, Béni-Bahdel qui sont des régions où la neige y est présente selon nos constatations en hiver. La part des crues qui se déclenchent très violemment dans la région de Mouileh est aussi à ne pas négliger. Cette zone est le plus souvent dévastée par des crues violentes et l'accès au cours d'eau devient très dangereux pour les opérateurs.

L'évaluation du pourcentage des mesures lacunaires a été faite sur la totalité des chroniques. Il existe dans les chroniques de certaines stations des mois entiers sans mesure, nous les avons classés selon l'importance du nombre de lacunes enregistrées qui sont respectivement :

- 1) la station de Béni-Bahdel donne un total de 06 mois de période lacunaire réparti sur la période de 31 ans choisie,
- 2) suivie de la station de Khemis avec 03 mois de lacunes et enfin,
- 3) la station de Lalla Setti avec 02 mois sans mesure.

Notre pourcentage de lacune a été estimé à 10% mais la persistance de valeurs nulles pendant les mois pluvieux (Mars, Novembre, Décembre) nous a aussi paru douteuse. Cette erreur (lacune comptée comme temps sec à tort), très fréquente en hydrologie opérationnelle est relativement sournoise. Elle amènera à remplacer la valeur locale, ceci

va conduire à travailler avec une donnée erronée ainsi le modèle pluie/débit pourra être critiqué à tort.

C'est pourquoi nous avons augmenté le pourcentage de lacunes à 20% en considérant certaines valeurs nulles comme suspectes et donc comme lacunaires. Par ailleurs, nous avons jugé ce pourcentage admissible du moment que notre choix a été limité à ces stations ce qui nous situe dans un contexte peu jaugé.

3-4 Contrôle des données pluviométriques et hydrométriques

Dans cette section, nous présentons l'étape de contrôle des données recueillies. Les questions que nous avons abordées sont les suivantes :

Que doit-on contrôler ? Comment procéder pour détecter et corriger les mesures suspectes?

Puisque les données recueillies étaient déjà numérisées, nous avons procédé à un premier contrôle qui a concerné la vérification des moyennes et des cumuls par rapport à ce qui a été mentionné dans des travaux antérieurs : méthode des cumuls simples, méthode des doubles cumuls et méthode de cumuls des résidus. En revanche, il ne nous a pas été possible de vérifier les changements que les stations ont pu subir, sauf lorsque cela était mentionné dans les feuilles de contrôle archivées.

1- Contrôle des données pluviométriques et hydrométriques

a- Contrôle des données pluviométriques

1- Méthode des cumuls simples appliquée sur les mesures pluie/débits

Nous avons effectué un premier examen pour évaluer l'organisation interne des données dans une même station à travers la méthode des cumuls simples. Cette méthode nous permet de détecter si les données collectées appartiennent bien à la même population.

Nous avons reporté pour les deux chroniques de débits et de pluies, en abscisse le temps en années et en ordonnée le cumul des précipitations et ou des débits, tels que :

$$Y_k = \sum_{i=1}^k p_i \text{ pour les précipitations}$$

Ou

$$Y_k = \sum_{i=1}^k q_i \text{ pour les débits}$$

Les cumuls simples obtenus correspondent aux totaux annuels des précipitations sur la période de 31 ans. Quand il y a stationnarité, les points relatifs de pluies et ou de débits sur le graphique devraient s'aligner (Brunet-Moret, 1971). Dans le cas contraire, les données vont s'individualiser en formant plusieurs segments indiquant la présence d'incohérences.

Pour le cas étudié (figure.22), l'ensemble des points s'alignent bien selon une droite, les mesures se répartissent de part et d'autre de la droite). Ce résultat suggère que l'échantillon de données a été bien tiré d'une même population. Cette méthode reste peu utilisée par la communauté des chercheurs ; elle n'aide pas vraiment à identifier s'il y a lieu de tendance et

ou de rupture sur les séries étudiées et ne fait pas intervenir la notion de corrélation entre stations puisqu'on ne travaille qu'avec des chroniques individuelles (Brunet-Moret, 1971) mais, elle reste un bon moyen de vérification de données d'une même station.

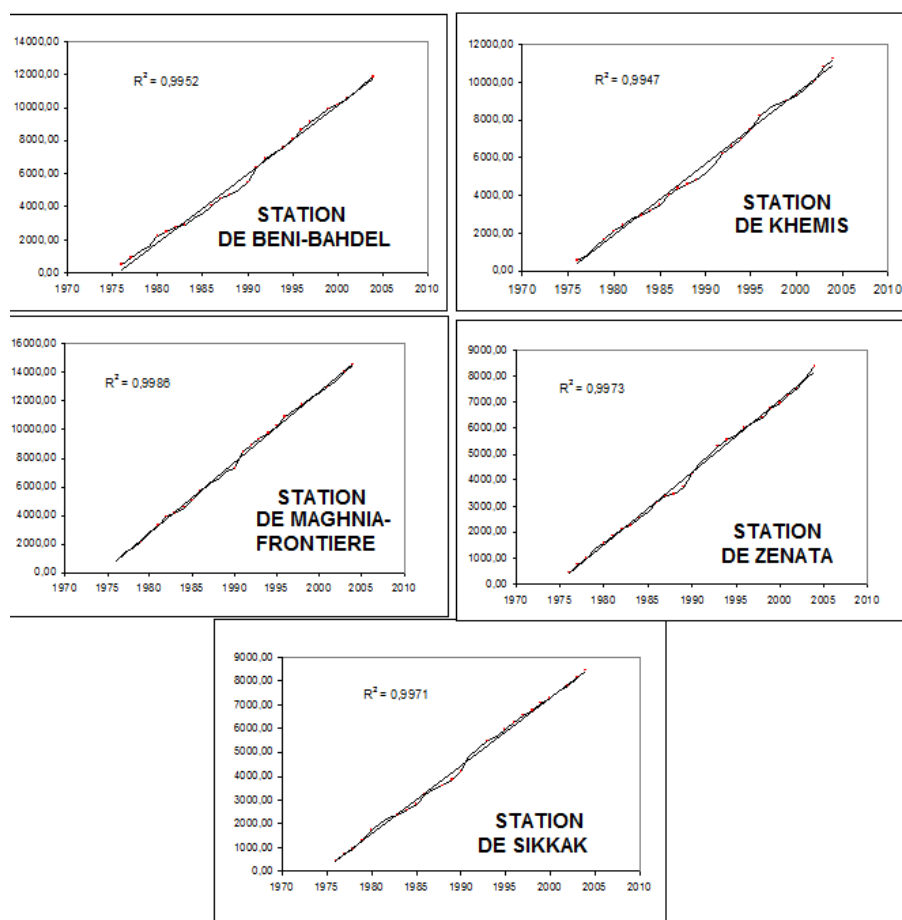


Figure.22 Représentations des cumuls simples

Pour plus de précision, nous avons testé les séries de précipitations et des débits avec la méthode des doubles cumuls et la méthode des cumuls des résidus dite aussi d'ellipses de Bois (2000).

2- Méthode des doubles cumuls appliquée aux données pluviométriques

Partant du principe que les précipitations ont un comportement régional, nous avons essayé de mettre en évidence, à travers cette méthode, que deux stations spatialement voisines ont un même comportement. La méthode consiste à représenter graphiquement une station de référence en fonction d'une autre à vérifier. Il en résulte un nuage de points qui devrait se présenter selon une droite bien définie. La non homogénéité des points se

traduit par le regroupement de ces derniers selon des segments non alignés. Si ce cas se présente, la station comporte nécessairement des données douteuses qui seront identifiables sur les graphes à partir des points d'inflexion ou de rupture.

On construit le graphe comportant en abscisse les cumuls de la station de référence et en ordonnée ceux de la station à vérifier.

$$Xi = \sum_{i=1}^i xi$$

$$Yi = \sum_{i=1}^i yi$$

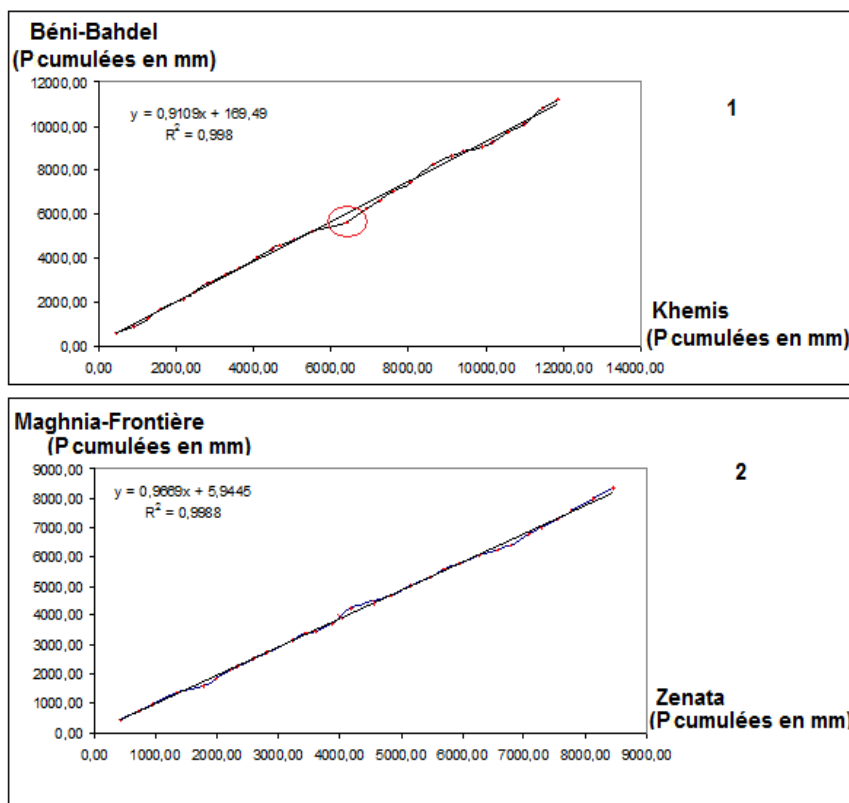


Figure.23 Représentation de la méthode des doubles cumuls

Les résultats de la méthode sont reportés sur la figure.23. Nous avons pris en considération le critère de proximité spatiale pour cette application. Les travaux antérieurs sur les précipitations dans le bassin de la Tafna ont pour la plupart pris comme station de référence celle de Béni-Bahdel et celle de Maghnia (Bouanani, 2004; Khaldi, 2005). Selon le principe de voisinage nous avons choisi d'effectuer les comparaisons entre les stations de Maghnia-Frontière / Zenata et celle de Béni-Bahdel/ Khemis. La majorité des points représentés sur la figure, ci-dessus, suivent une droite sauf quelques points qui se dégagent

relativement du nuage obtenu mais, sans qu'ils manifestent un état net de non homogénéité. Cette méthode de double cumul ne propose pas des seuils de probabilité pour les erreurs détectées ce qui la rend du point de vue statistique un peu faible (Meylan et Musy, 1999). Cette technique nous permet d'énumérer les erreurs quant aux corrections nous les avons effectué par la méthode de Bois (1971)

3-Ellipse de Bois appliquée sur les données pluviométriques

La méthode d'Ellipse de Bois (1971) dite aussi des cumuls des résidus est utilisée pour identifier avec précision l'homogénéité des données d'une station. Cette technique est similaire à celle de la méthode des doubles cumuls sauf que la technique de Bois substitue le cumul des mesures par le cumul des écarts des résidus de la droite de régression linéaire. Elle fournit un seuil de probabilité à partir duquel l'hypothèse de non -homogénéité de la station testée serait significative. Elle permet aussi de corriger les données douteuses par la droite de régression qu'elle propose entre Y (station à tester) et X (station de référence). D'un point de vue pratique, cette méthode nécessite l'existence de deux stations une de référence X_i (0,n) et une autre à tester $Y_i = Y_i$ (0,..... n). Théoriquement, elle admet préalablement que les deux variables (X,Y) sont intercorrélées, gaussiennes et stationnaires en moyenne et en variance.

*La droite de régression de y en x s'écrit alors, sous la forme :

$$y_i = ax_i + b + e_i$$

*Les résidus sont obtenus par l'équation :

$$e_i = Y_i - \bar{Y}_y - r \frac{S_y}{S_x} (X_i - \bar{X}_x)$$

Le cumul est obtenu : $Z_k = e_1 + \dots + e_k$ $k < n+1$
 $Z_k = Z_{k-1} + e_k$

Avec $k \leq$

e_i : est l'écart de la valeur réelle de Y, r : est le coefficient de corrélation entre les deux séries, S_y, S_x les variances respectives s des deux séries et \bar{X}, \bar{Y} sont les Moyennes.

Si le tracé des résidus aboutit à une courbe oscillant sur l'axe des abscisses, la série peut être considérée comme homogène. Le cas contraire, correspond à une non homogénéité.

Les figures, ci-dessous représentent les résultats des résidus cumulés après le traitement des données de pluie à l'aide le logiciel Hydrolab 98.2 (Laborde & Mouhous, 1998).

Une analyse globale des graphiques montre que les mesures sont cohérentes sauf pour la mesure de 1990 à la station de Khemis qui paraît suspecte. Les données douteuses ont été répertoriées pour chaque station puis vérifiées, et à la fin corrigées par la droite de régression que nous avons obtenue pour la même méthode. Nous avons illustré dans la

figure 24, ci-dessous, un exemple de traitement par la méthode de Bois adoptée pour toutes les stations.

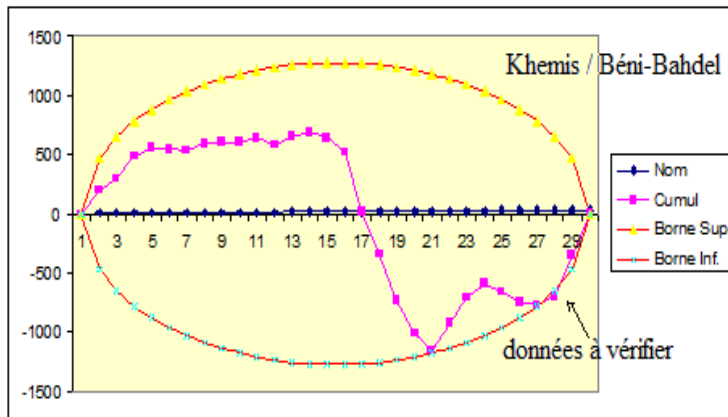


Figure 24 Représentation de la méthode des cumuls des résidus appliquée sur les stations étudiées

Après ce traitement de données douteuses nous avons pu corriger les jours lacunaires par le report de la moyenne mensuelle interannuelle du mois correspondant.

b- Contrôle des données hydrométriques

a) critique des données hydrométriques

Comme premier examen des données de débits, nous avons adopté les mêmes techniques de détection d'inhomogénéité que pour les pluies, à savoir les méthodes de doubles cumuls et celle des cumuls des résidus. L'examen des mesures de débits s'est avéré satisfaisant. Les examens cités plus haut ont défini des séries provenant d'une même population et représentant des données homogènes.

Nous avons ensuite vérifié la concordance des évènements pluvieux avec les débits qui en résultent. On observe que la majorité des épisodes pluvieux coïncide avec ceux des débits (mis à part quelques épisodes pluvieux qui ne génèrent pas les débits). La figure 25 illustre ces observations ainsi dans le cas du bassin de Mouileh d'importants débits ne reflètent pas la quantité de pluie tombée, nous attribuons cela à la qualité des données pluies utilisées sur la région d'Oujda (Eureka 40). Dans le cas de la station d'Ain youcef, nous relevons qu'une pluie de faible intensité semble avoir généré un écoulement important avec un pic de crue semble très exagéré à la station par exemple d'Ain Youcef (Sikkak).

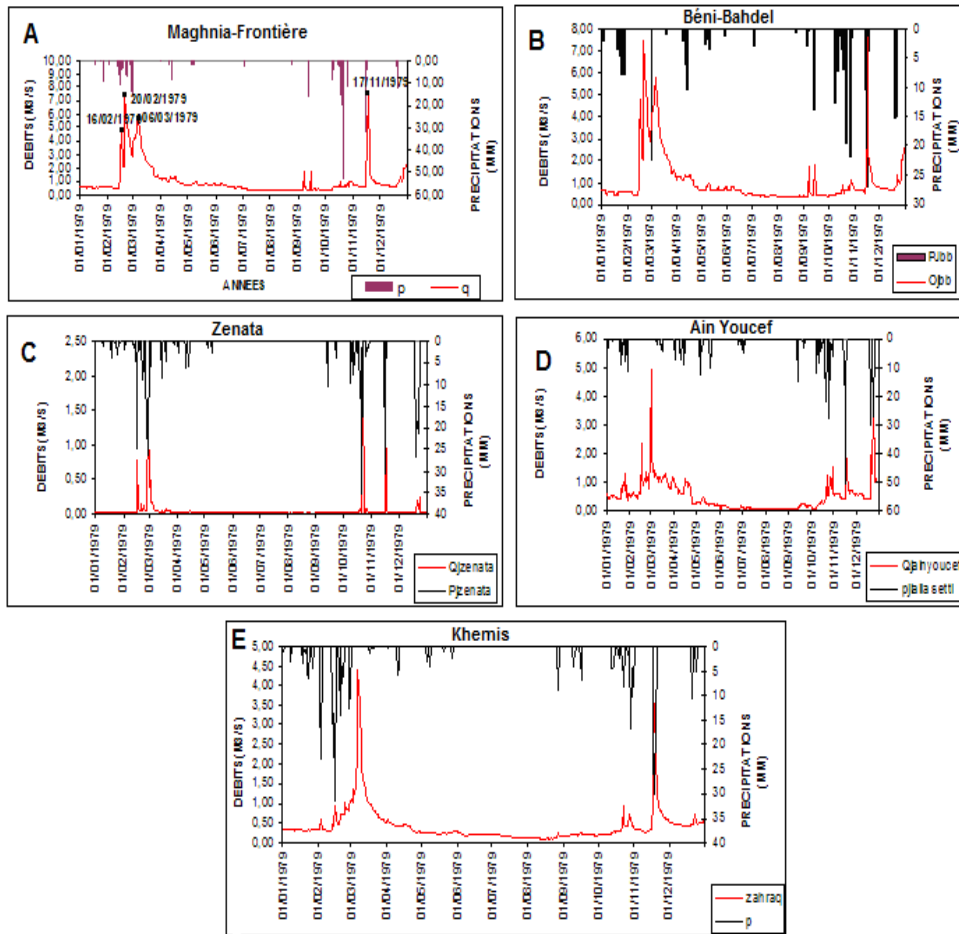


Figure. 25 Ecoulements dans les sous bassins étudiés sur un cycle hydrologique

Les forts débits sont constatés durant les mois de mars et de décembre sur l'ensemble des sous bassins étudiés.

Nous avons aussi tenté de vérifier si les données sont bien représentatives des bassins étudiés pour avoir une vue spatiale des différents sous-bassins de l'amont vers l'aval. Pour cela, nous avons reporté les débits spécifiques maximaux en fonction des surfaces des bassins (figure.26). Les mesures ont été ajustées avec une loi puissance selon le modèle de Myer (Gaume et al., 2009, Boutoutaou et al., 2011) :

$$Q_{s_max} = \alpha A^\beta$$

Q_s : débits maxima en l/s/km².

α : Coefficient de Myer.

β : Exposant variant entre 0,4 et 0,8.

La figure 26 présente les trois stations qui ont défini une adéquation à la loi puissance, les deux stations de Zenata et Sikkak (reportées en rouge) ont été éliminées du fait qu'elles ont entraîné une dégradation de la loi recherchée. Il en ressort que le regroupement des cinq stations ne serait décrit avec une loi puissance. Le coefficient de corrélation déterminé entre les trois stations est de 40%.

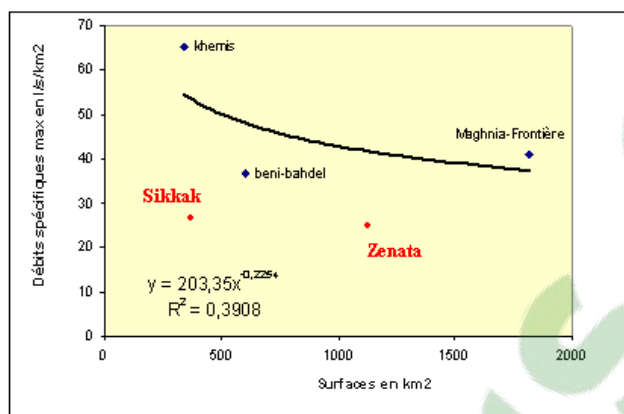


Figure. 26 Représentation des débits spécifiques en fonction de la surface des sous bassins

La seule explication qu'on pourrait proposer est que la variabilité des écoulements dans le bassin est tellement importante que l'écoulement maximum ne dépend pas de la seule surface disponible sur chaque sous bassins à fortiori quand le bassin n'est pas homogène. Par ailleurs, quand la karstification est importante, la surface présente une aire plus faible à la circulation des eaux. La présence d'exokarst favorise l'infiltration précoce des eaux de ruissellement. Dans un tel contexte, l'influence de la surface est affectée.

3-5 analyse des régimes pluviométriques et hydrométriques

Dans cette section, nous présentons plusieurs approches qui nous ont permis d'avoir une synthèse sur l'évolution des écoulements et des précipitations dans le bassin de la Tafna. Bien que l'analyse se soit avérée difficile au début compte tenu de l'incohérence des données, nous avons néanmoins réussi à proposer une synthèse sur les régimes de pluies voire de débits et leurs variations dans le bassin étudié. Une synthèse bien détaillée est reportée en Annexe Bakreti et *al.* (2013).

Les grandeurs calculées pour mettre en exergue ces variations sont : les régimes annuels et mensuels des pluies et des débits, l'analyse des températures moyennes annuelles, l'analyse des écoulements de base, l'hydraulicité, l'étude des événements extrêmes (crues), l'analyse du BFI (Base Flow Index) et l'indice de concentration saisonnier des pluies (PCI).

Sur la plupart de ses grandeurs, nous avons appliqué des tests de détection de rupture et de tendance. L'objectif visé est d'identifier la part des évolutions des

précipitations sur les débits imputables à des évolutions du climat et celle qui pourrait résulter d'autres sources.

A cet effet, nous avons fait appel, entre autres, aux tests de Wilcoxon-Mann-Whitney pour vérifier la pertinence en termes d'apports entre les stations des sous-bassins en plaine et en altitude et de consolider cette distinction

3-5-1 Méthodes appliquées pour la description des régimes pluviométriques et hydrologiques

1- Régime pluviométrique

Pour la description des régimes pluviométriques, nous avons calculé, sur les 31 années disponibles, les cumuls annuels de pluie. Ces derniers ont été aussi calculés à l'échelle mensuelle, année par année, ce qui nous a permis d'examiner leur variabilité interannuelle à travers les box-plots.

Pour avoir plus d'information sur leur régime saisonnier, nous avons recherché à estimer l'indice de la concentration des précipitations, noté PCI (Oliver, 1980) le plus souvent suggéré dans des études similaires. Il est déterminé par la formule :

$$PCI = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P_a^2}$$

$i=1, \dots, 12$ avec P_i = précipitations mensuelles en mm et P_a = précipitations annuelles en mm.

Nous nous sommes appuyés pour nos interprétations sur le tableau 6 l'explication

Indice de concentration des précipitations "PCI"	Saisonnalité
<10	Uniforme
11-15	Modérée
16-20	Saisonnier
>20	Forte

Tableau 6. Indice de concentration des précipitations Oliver (1980).

2- Régime hydrologique

Nous avons consacré beaucoup de temps pour synthétiser l'évolution des écoulements à l'échelle du bassin étudié. Notre objectif était de présenter de la manière la plus explicite possible la contribution en termes d'apport de chaque sous bassins POUR NOUS renseigner soit sur les lames d'eau écoulées soit encore sur les comportements particuliers des sous systèmes afin de présenter un état général des écoulements dans le bassin étudié.

Pour la description des régimes hydrologiques, nous avons calculé sur les 31 années disponibles, les cumuls annuels et mensuels de débit pour mettre en évidence leur

variabilité avec entre autres le calcul des paramètres suivant : L'indice d'hydraulicité, les débits classés, les hydrogrammes normés, BFI, ...

a-Hydraulicité

Parmi les indices caractérisant aussi les régimes d'écoulements, on retrouve le coefficient d'hydraulicité. Cet indice est utilisé lorsqu'il s'agit d'analyser un régime d'écoulement à travers la recherche d'une éventuelle irrégularité interannuelle. Il est obtenu en rapportant les valeurs des modules annuels aux modules interannuels couvrant la période d'observation. Après calcul, le résultat correspond à un ensemble d'indice oscillant autour de l'unité. Une valeur d'hydraulicité < 1 traduit une année sèche, par contre une valeur > 1 définit une période humide.

b-Hydrogrammes normés

La technique de l'hydrogramme normé fournit des indications précieuses concernant l'identification des événements extrêmes notamment la dispersion de la dynamique des crues (Latapie, 2011). Cette technique a été très étudiée ces dernières années par Sauquet (2009) et Lang et al. (2007). Le principe consiste à sélectionner puis d'extraire pour chaque année de la chronique étudiée des événements extrêmes le plus souvent identifiés par des pics bien distincts. Une fois les événements déterminés, une transformation adimensionnelle leur est appliquée. Cette forme est le résultat du rapport entre le débit moyen par son débit de pointe ou débit max. L'hydrogramme final correspond à des valeurs maximales n'excédant pas l'unité. On construit par la suite un hydrogramme supposé représentatif de la médiane des hydrogrammes.

La figure 27 présente la forme générale de l'hydrogramme normé avec en trait gras l'hydrogramme moyen résultant et en gris les courbes des événements qui ont permis son calcul. Il est à noter que l'échelle temporelle adoptée est le plus souvent le pas de temps horaire. Pour le cas de notre bassin, nous avons travaillé avec un pas de temps journalier selon la disponibilité de nos données.

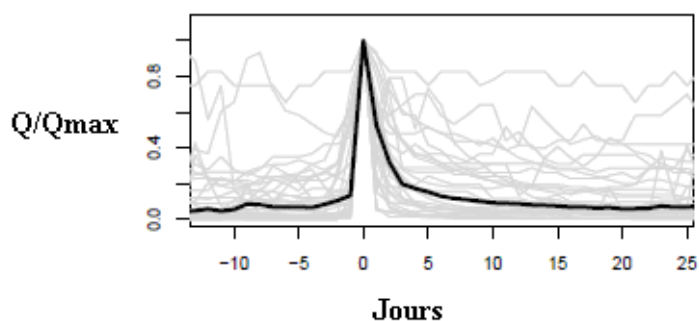


Figure.27 Exemple de calcul d'un hydrogramme normé au pas de temps journalier sur un des sous bassins de la Tafna (Khemis)

c- Courbes des débits classés

Cette technique est adoptée quand on est amené à quantifier les variations des débits s'écoulant à travers un bassin versant soit par leur importance ou leur faiblesse. La méthode consiste donc à organiser les débits selon leur fort volume enregistrés selon un seuil de dépassement indiqué par le module annuel calculé (dépassement par valeurs supérieures, ou inférieures). La représentation graphique repose sur le report en abscisse des périodes de dépassement sous forme de fréquences relatives et en ordonnée les débits moyens par ordre décroissant [nous réservons le détail de la méthode dans la section résultat.]

d- Calcul de l'écoulement de base et du Base Flow Index (BFI)

Le Base Flow Index (BFI) est défini comme le rapport entre l'écoulement de base moyen annuel et le débit moyen annuel d'un cours d'eau. On trouvera dans (Sauquet et al, 2009) une description récente de cet indice initialement introduit par l'institut of Hydrology, (1980). L'indice donne des valeurs comprises entre 0 et 1. Les fortes valeurs indiquent l'existence d'une forte composante souterraine (Sauquet, 2009). Cet indice permet d'identifier, sans la prise en compte de l'influence du climat, toute perturbation d'origine anthropique qui pourrait affecter l'écoulement (Viramontes & Descroix, 2000).

Plusieurs auteurs ont proposé par la suite, d'autres algorithmes et méthodes pour le calculer : Chapman (1991), Tallaksen & Van Lanen (2004). Nous avons entrepris le calcul du BFI à l'aide de l'algorithme de Tallaksen & Van Lanen (2004). Le principe consiste à déterminer le débit de base qui est obtenu après avoir subdivisé la chronique en intervalles de n points qui ne se chevauchent pas. On recherche ensuite les minima locaux (appelés aussi « turning points ») sur chaque intervalle. La courbe des débits de base est finalement obtenue, par interpolation linéaire de ces points d'inflexion.

Le filtrage du débit de base et le calcul du BFI ont été réalisés sur les cinq sous-bassins de la Tafna. La durée de référence utilisée ($n=5$ jours) est particulièrement adaptée aux bassins versants dont la durée des crues est de l'ordre de un à deux jour. La Figure. 28 donne une illustration de la méthode pour une période de 2 mois.

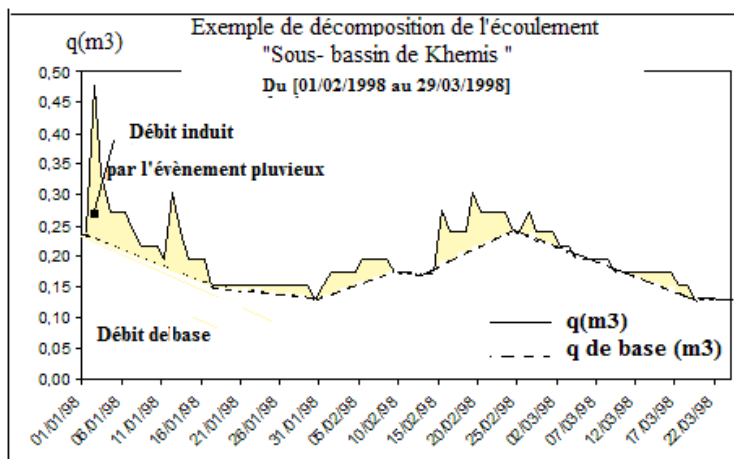


Figure. 28: Illustration de la méthode de calcul du débit de base pour la station de Khemis

Remarque

Il serait faux d'interpréter les débits supérieurs au débit de base comme la partie de l'eau de pluie qui ne s'est pas infiltrée.

3-5-2 Méthodes appliquées pour la détection des tendances et ruptures sur les données de pluies et de débits.

L'analyse a été effectuée sur les variables suivantes : précipitations et débits annuels, débits spécifiques moyens annuels, et températures moyennes annuelles. Nous avons aussi effectué l'analyse pour les débits de base moyens annuels et le BFI présenté plus haut.

Le traitement des données s'est effectué en plusieurs étapes :

- Sélection des chroniques couvrant la même période.
- Recherche de ruptures significatives dans les séries avec le test de Pettitt (1979).
- Recherche de tendances linéaires dans les séries par régression linéaire et utilisation du test de Mann-Kendall pour déterminer si les tendances suspectées étaient significatives.

Les tests de Pettitt (1979) et de Mann-Kendall (Mann et Whitney, 1947) sont des tests statistiques dits non-paramétriques car ils ne font aucune hypothèse sur la loi de distribution des données. Ils sont donc adaptés aux données hydrométéorologiques pour lesquelles les distributions sont souvent dissymétriques. Ils appartiennent à la catégorie des tests dits « de rang » car ils s'appliquent sur le rang des valeurs et non sur les valeurs elles-mêmes. Notons que rupture et tendance correspondent à deux formalisations mathématiques distinctes d'un possible changement, quand bien même les tests peuvent, au vu d'un jeu de données particulier, être tous les deux significatifs.

1- Détection de ruptures

Le test de Pettitt permet de détecter des ruptures dans les séries chronologiques. L'hypothèse H_0 testée est la suivante : « il n'y a pas de rupture ». Le test repose sur les signes des différences entre valeurs qui forment l'échantillon. Une série temporelle résultante est élaborée. Au maximum observé sur la série correspond vraisemblablement la date de rupture (Lubès et al, 1998). La valeur p de la statistique permet de savoir si cette rupture est statistiquement significative au seuil α . La probabilité de non-dépassement est donnée par :

$$F(z) = p(Z \leq z) = 1 - 2 \exp\left[-6z^2 / (5n^3 + n^2)\right]$$

où n est le nombre d'observations de l'échantillon.

L'existence d'une date de rupture significative implique le rejet de cette hypothèse à un instant T qui correspond à la date recherchée (Lubès et al, 1998).

2- Détection de tendances linéaires

Une première recherche de tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) a été effectuée à l'aide de régressions linéaires entre la variable d'intérêt $y(t)$ et la date t : $y(t) = at + b$. Le coefficient de pente de la régression nous renseigne sur le signe de la tendance, Rivard et al (2003) expliquent cependant que la méthode de la régression à elle seule n'est pas suffisante pour affirmer une tendance. Le test de Mann-Kendall permet de vérifier si

cette tendance est significative d'un point de vue statistique. L'hypothèse H_0 testée est « il n'y a pas de tendance ». Si p est inférieur à un seuil de significativité choisi, l'hypothèse H_0 est rejetée et on conclut à l'existence d'une tendance significative, au seuil choisi (Sicard, 2006).

La robustesse du test a été validée par plusieurs essais de comparaison effectués par Yue et al (2004). Dans le cas de variables auto-corrélées, le test de Mann-Kendall doit être modifié pour prendre en compte l'effet de l'auto-corrélation. Il s'agit essentiellement d'ajuster la taille de l'échantillon pour prendre en compte le fait que toutes les observations ne sont plus indépendantes. Nous renvoyons sur les publications de Yue & Wang (2004) ; Renard (2006) et Renard et al. (2006b) pour les détails des calculs correspondants.

D'un point de vue pratique, les tests ont été appliqués en s'appuyant sur les fonctions existantes dans le logiciel R (R Development Core Team, 2004) pour le test de Mann-Kendall usuel et des fonctions développées dans R pour les tests de Pettitt et de Mann-Kendall modifié. Sur les séries annuelles dont nous disposons, l'autocorrélation n'était pas significative et le test de Mann Kendall standard a pu être utilisé.

3- Comparaison d'échantillons

Nous avons souhaité analyser et rechercher l'existence de différences dans les comportements hydrologiques entre les deux zones identifiées par l'analyse du relief (zone d'altitude et de plaine). Pour ce faire, nous avons utilisé le test de Wilcoxon-Mann-Whitney qui permet de vérifier si de telles différences sont bien significatives.

Appartenant au groupe des tests non paramétriques, le test de Wilcoxon (1945) est un test dit de rang. Il est considéré comme une alternative équivalente au test de Mann-Whitney (1947) dans le cas des échantillons appariés (Rakotomalala, 2008). Son principe est de tester l'hypothèse H_0 de similitude des distributions de deux échantillons avec un seuil de significativité donné.

Pour notre application, nous avons testé l'hypothèse nulle H_0 d'égalité des distributions ou son alternative $H_1 = H_0$ de différence entre ces distributions.

Principe du test :

L'approche se base sur le classement des données appariées de deux échantillons (X_1, \dots, X_n) et (Y_1, \dots, Y_m) par ordre croissant. Puis on affecte à chaque différence non nulle obtenue son rang de classement.

On note les $+w$, la somme des rangs strictement positives, et $-w$, la somme des rangs strictement négatives ; on vérifie que la somme de $+w$ et $-w$ vaut $\frac{N(N+1)}{2}$

Pour les échantillons de plus de 25 valeurs, w suit une approximation normale $N(\mu, \sigma)$

$$\text{Avec } \mu = \frac{N(N+1)}{2} \text{ et } \sigma = \sqrt{N(N+1)(2N+1)/24}$$

μ est comparé à une valeur critique μ_α liée à N et au seuil α fixé au départ.

Nos calculs ont été réalisés avec la fonction du test de Wilcoxon implémentée dans le logiciel R.

3-6 Résultats de l'analyse sur les régimes pluviométriques et hydrométriques

3-6-1 Résultats de l'analyse du régime pluviométrique et détection de *tendances/ruptures*

1- Régime annuel des précipitations

Nous avons présenté la distribution annuelle des cumuls pluviométriques aux 5 stations. Elle montre que chaque zone est soumise à des conditions climatiques assez particulières. Les parties en altitude semblent les plus arrosées, excepté la station de Lalla-Setti (~Sikkak) qui se trouve à une altitude très importante (1 007 m) tandis que la zone à laquelle elle correspond est à un niveau plus bas 575 m (Tableau 4). Cette forte dénivelée est à relier à la tectonique intense qui a structuré le relief de la région (Benest, 1990).

Les totaux annuels des précipitations mettent en évidence le contraste des quantités reçues entre les parties en altitude et celles en plaine. Le modèle numérique de terrain auquel est associé la distribution des totaux annuels illustre bien cette distinction à travers l'examen des quantités reçues au niveau des stations en montagne (Khemis, Beni- Bahdel et Lalla-Setti) de l'ordre de 400 mm et des stations en plaine (Zenata et Mouileh-frontière) qui enregistrent des quantités beaucoup plus faibles (< 300 mm). La figure 29 en donne une illustration. On y observe une variabilité interannuelle relativement forte avec un intervalle interquartile de l'ordre de 150 mm.

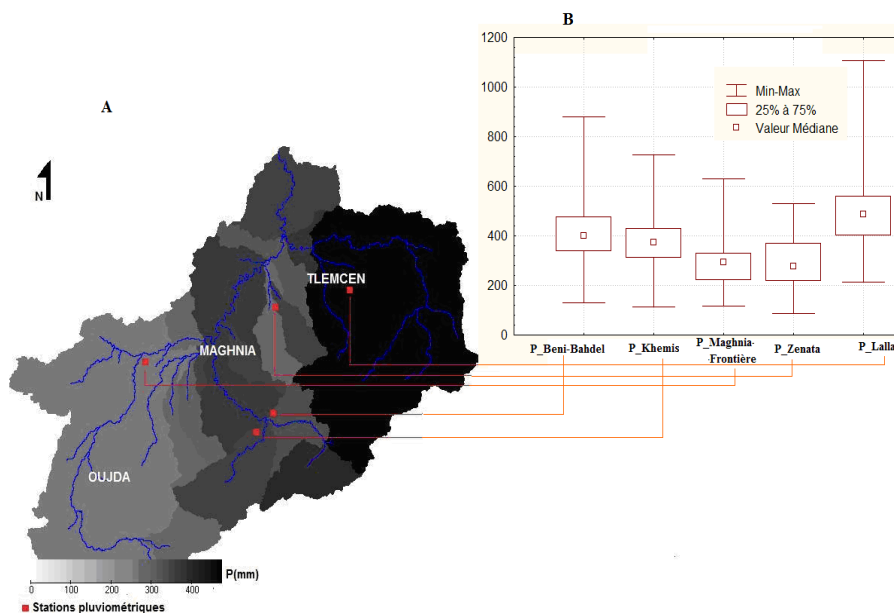


Figure. 29 A)Cartographie du module annuel de la pluie sur le bassin de la Tafna et B)
Distributions des valeurs correspondantes

Nous avons appliqué le test de Wilcoxon-Mann-Whitney sur les séries de précipitations afin de déterminer si le contraste en termes de moyenne d'eau précipitée entre les stations en altitude et celles de plaine était significatif pour toutes les combinaisons de stations prises deux à deux. Il ressort de l'analyse que toutes les paires "plaine/ relief" diffèrent au seuil de 5%, et que toutes les paires « plaine/plaine » ou « altitude/altitude » présentent une p_value (0.588 en plaine, 0.711 en altitude) qui est non significative (>0.05). En conséquence, les différences de pluviométrie entre les stations en altitude et en plaine sont significatives, et cette conclusion ne dépend pas des stations particulières considérées.

Les résultats sont certes attendus (les pluies sont en général plus abondantes en altitude), mais légitimement le découpage en deux entités distinctes (zone d'altitude et de plaine) que nous proposons. Ce découpage en deux entités s'avère suffisant pour l'analyse hydrologique, ceci ne remet aucunement en cause la présentation classique du bassin, qui parce qu'elle prend en compte d'autres éléments, fait plutôt état de trois zones (Haute, Moyenne et Basse Tafna, voir la présentation du bassin d'étude).

2- Indice des précipitations saisonnières ou PCI

L'indice saisonnier PCI est présenté sur la Figure30, le PCI traduit pour toutes les stations une saisonnalité modérée avec des valeurs toutes comprises dans l'intervalle [11-15]. Cet indice n'est donc pas discriminant à l'échelle du bassin.

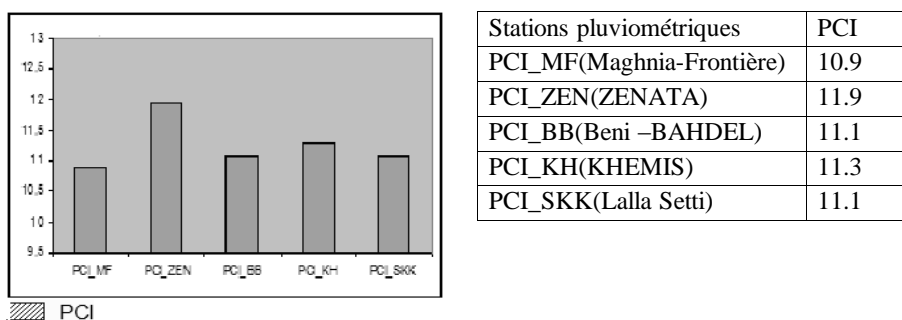


Figure. 30 Représentation de l'indice de concentration
des précipitations pour les sous bassins étudiés

3- Précipitations mensuelles

Les régimes des pluies mensuelles sont présentés sur la figure.31. Les périodes les plus sèches s'étendent de juin à août pour toutes les stations. On distingue clairement que les minima sont observés en période d'été (juin, juillet, août) alors que les périodes d'hiver, de printemps et d'automne sont les plus humides. La même figure révèle une forte

variabilité interannuelle des précipitations des différents mois, surtout sur les périodes les plus pluvieuses (automne et hiver). Pour la période étudiée, on observe des distinctions relativement marquées en termes de quantités de pluie reçue, qui est plus forte pour les stations en relief.

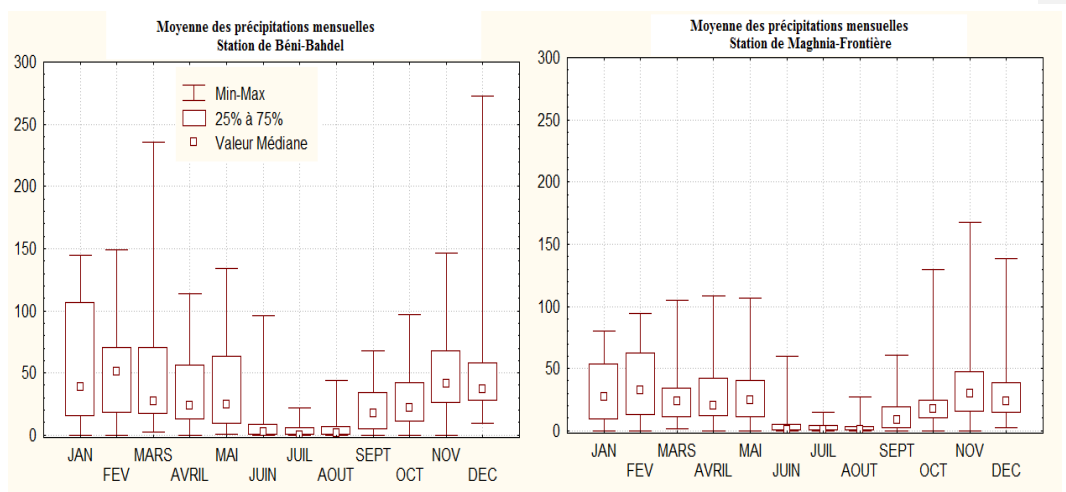


Figure.31 Variations des précipitations moyennes mensuelles aux stations de Béni-bahdel et Maghnia- Frontière

4- Détection de tendances et ruptures sur les chroniques des précipitations

L'application du test de Pettitt sur les chroniques de précipitations annuelles avec les seuils α : 0.05, 0.01 et 0.10 ne conduit pas à la détection de ruptures significatives et l'hypothèse H_0 relative à l'acceptation de l'existence d'une rupture est rejetée.

Ce résultat est obtenu pour toutes les stations étudiées, en plaine comme en altitude (tableau 7). De même, le test de Mann-Kendall ne détecte pas de tendance significative sur les différentes stations pluviométriques. Cette recherche de rupture/tendance a été aussi appliquée aux précipitations saisonnières sans résultats significatifs sur la période étudiée. Notons que les tests sont affectés par la variabilité des données, ici très forte et compte tenu, aussi de la variabilité du signal. Il est à noter que les tests utilisés ne se prononcent pas sur l'existence intrinsèque d'une tendance. C'est le principe même des tests statistiques qui sont assortis de risques de première espèce et seconde espèce.

5-Analyse de tendance/rupture sur la série de température

La figure 32 présente la variation de la température moyenne annuelle à la station de Maghnia. Cette grandeur présente une variabilité très faible. La zone semblerait donc avoir une température moyenne annuelle homogène.

Les tests de rupture et de tendance ont été effectués sur ces chroniques des températures moyennes annuelles aux seuils : 0.05, 0.01 ,0.1. Ils n'ont révélé aucune rupture ni tendance significative durant la période [1977-2004].

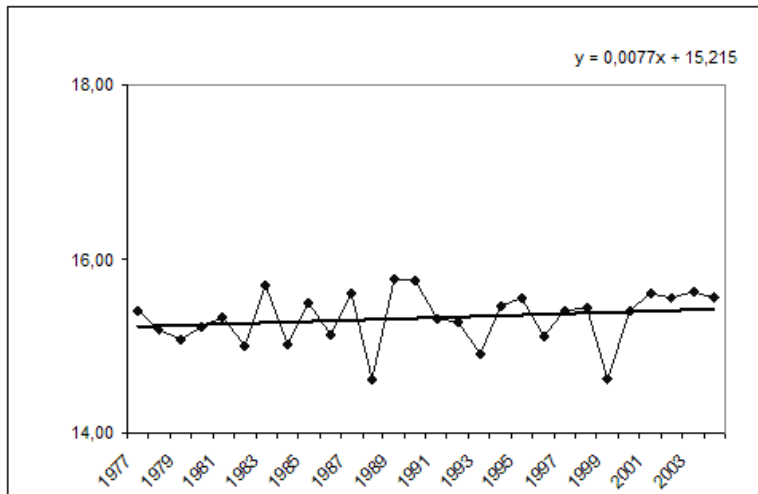


Figure. 32 Chronique des températures moyennes annuelles à la station de Maghnia [1977-2004].

Une tendance a aussi été recherchée sur les moyennes des températures saisonnières (figure.33) pour la période [1977-2004]. Aux seuils α : 0.05, 0.01 et 0.10, une seule tendance à la hausse a été détectée au seuil de 10% pour les températures printanières [mars, avril et mai]. Cette hausse est d'environ 0.2°C tous les dix ans. Aucune tendance n'a été détectée pour les autres saisons.

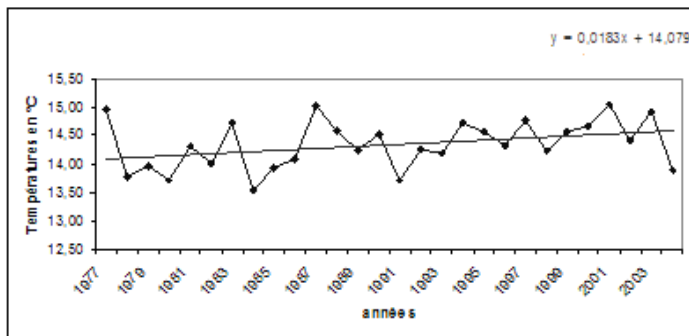


Figure. 33 Chronique des températures de printemps à la station de Maghnia [1977-2004].

3-6-2 Résultats d'analyse sur les régimes hydrologiques et analyse de tendance/rupture

Dans cette partie, nous présentons les résultats de l'étude du régime des écoulements à travers l'analyse des grandeurs suivantes : hydraullicité, débits classés, hydrogramme normé, débits moyens annuels, débits de base, BFI sur la période de 30 années (1976-2006). Une analyse de comparaison des distributions de ces derniers paramètres par le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a aussi été menée en parallèle aux tests de tendance/rupture entre une station représentative de la zone de relief et une station de la zone de plaine.

1- Hydraullicité

Pour notre application, le coefficient d'hydraullicité a été calculé pour chaque année puis synthétisé sur la figure 34. Les graphiques traduisent un comportement assez particulier des sous bassins étudiés. Les bassins en montagne, dont la plateforme est essentiellement karstifiée, définissent un état d'équilibre qui s'exprime par l'alternance période humide - période sèche. Nous attribuons cela à la contribution du karst qui soutient les écoulements même en période d'étiage. Les bassins en plaine, quant à eux, dont le processus de karstification est faiblement présent ou parfois totalement absent, sont affectés par des périodes humides très intenses dépassant largement la valeur 1. Le bassin de Zenata définit un comportement surprenant des débits écoulés durant les années 1989 et 1998 au vu du faible apport pluviométrique. La même observation est valable pour le sous bassin de Mouileh qui présente aussi des volumes écoulés importants. Nous avons remarqué aussi que l'indice d'hydraullicité des différents bassins étudiés tend vers une baisse si on regarde bien les pics des courbes de 1975-2006 mais cette constatation reste à valider par des tests statistiques.

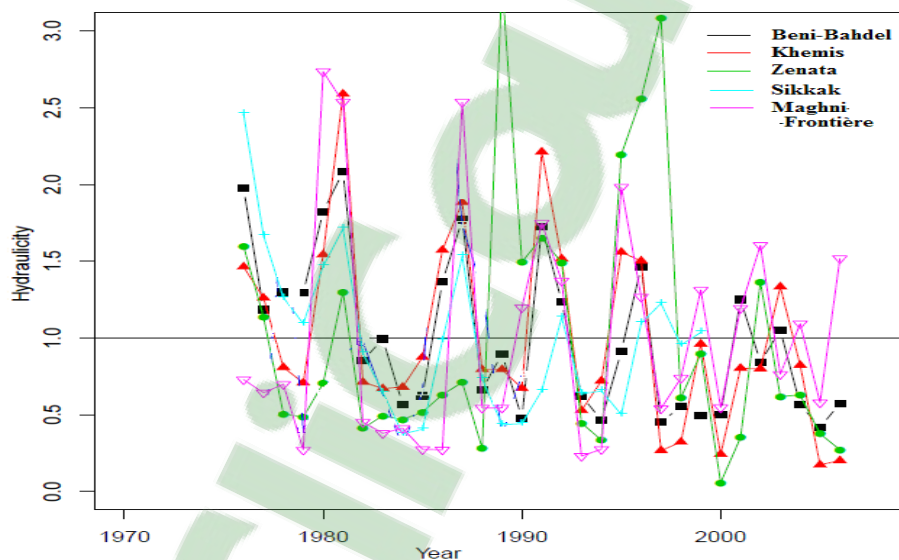


Figure.34 Représentation de l'hydraullicité dans les sous bassins étudiés.

2- Etude des débits classés

Pour affiner la description des régimes hydrologiques, nous avons fait appel à la méthode des débits classés en utilisant des valeurs normés sur les modules (les valeurs de débits sont rapportées au débit moyen), notamment sur les débits spécifiques.

Le recours à la normalisation va permettre non seulement de rendre compte du comportement des sous bassins en étiage mais aussi la mise en évidence de l'influence de leurs surfaces.

Après application aux données des débits journaliers et aux débits spécifiques, nous avons pu dégager les constatations suivantes:

La figure 35 illustre le comportement de l'ensemble des sous bassins étudiés qui semble s'individualiser uniquement à la fin de l'écoulement.

- Le bassin de Beni-Bahdel est le seul bassin à maintenir l'écoulement avec des débits importants pendant l'étiage.
- Le sous bassin de Zenata manifeste aussi un comportement particulier en atteignant la fraction nulle à seulement 30%. Ses débits normés sont très faibles.

Il est plus aisé de comparer les bassins entre eux en utilisant les débits spécifiques. La distinction entre les groupes de bassins est plus nette notamment entre les sous bassins karstifiés et non karstifiés. On observe aussi une similarité des distributions des débits spécifiques des sous bassins Khemis, Béni-Bahdel, Sikkak dont le phénomène de karstification est au même stade. Les débits spécifiques sont systématiquement plus élevés pour les bassins karstiques, y compris en étiage, même si les écoulements de la station de Sikkak sont nuls 20% du temps, ce qui n'est pas le cas pour la station Maghnia frontière.

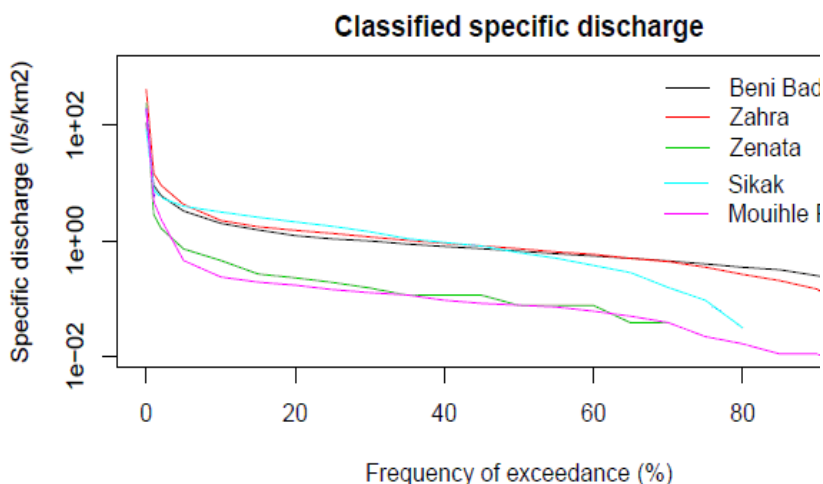


Figure. 35 Représentation courbes des débits classés normalisés par le module annuel et des débits spécifiques classés

3- Ecoulement mensuel

La Figure.36 présente les débits moyens mensuels des stations étudiées. Les histogrammes illustrent nettement la variation de l'écoulement au sein du bassin de la Tafna. Les régimes résultants sont de type pluvial-évaporal (Bakreti et al.,2012), on observe que les écoulements sur ce bassin se comportent d'une manière différente à haute et à basse altitude. Les systèmes en plaine (Maghnia_Frontière, Zenata) sont caractérisés par des courbes bimodales. Les deux pics représentent les maxima de volumes écoulés, le premier est noté en automne alors que le deuxième, plus important, se situe au printemps.

Quant aux bassins en altitude comme Beni-Bahdel et Khemis la courbe de régime est unimodale représentant ainsi un régime simple avec un pic caractérisant le maxima de volume pendant le printemps. Ceci correspond probablement pour partie à la fonte des neiges comptabilisée dans le bilan hydrologique du bassin de la Tafna (Bakreti et al., 2012), les écoulements deviennent plus faibles en été sur l'ensemble des sous-bassins. Les bassins en plaine semblent les plus secs ; on enregistre sur la station de Maghnia_Frontière plus de 5 mois correspondant à une période faible en apports même constatation pour le bassin de Zenata. En revanche, on note, pour la même période, que les sous-bassins en hauteur (Béni-Bahdel) reçoivent quant à eux presque le double de la quantité écoulée enregistrée sur les sous-bassins en plaine. Le bassin de Sikkak quant à lui, présente un comportement similaire au bassin en relief en hiver mais l'automne semble une période particulière où des débits importants sont observés. Les périodes les plus sèches s'étendent sur quatre mois de juin à septembre.

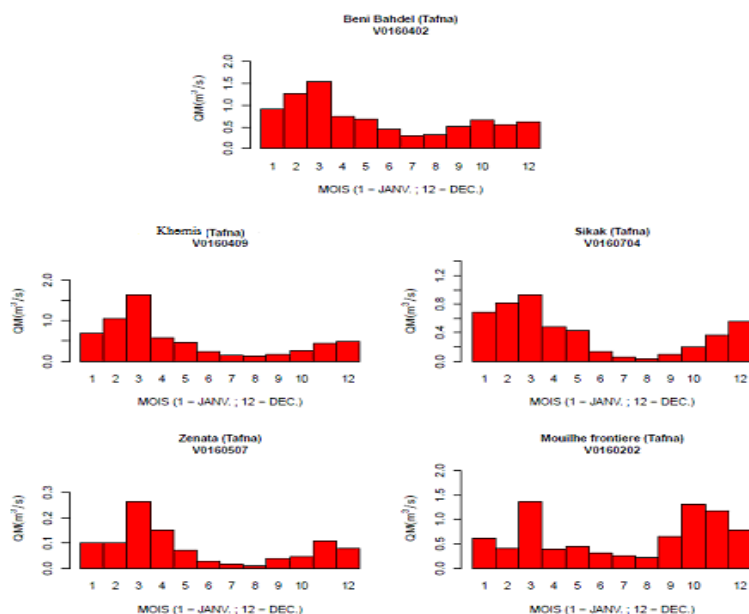


Figure. 36 Régime mensuel des sous bassins de Béni-Bahdel, Khemis, Sikkak, Zenata et Maghnia_Frontière.

4- Les hydrogrammes normés

Cette application nous a demandé l'utilisation du script développé par Sauquet (2009) sous l'environnement R. La méthodologie consiste à sélectionner des événements pluvieux identifiés par les pics de crues. Une normalisation est affectée par la suite, à tous les événements extraits de telle façon que les débits max = 1. Une durée maximale de crue est aussi extraite renseignant sur l'importance de la dynamique des crues dans le bassin. Le traitement des différents événements conduit à la construction de plusieurs hydrogrammes à partir desquels un hydrogramme unitaire normé moyen est déduit. Les résultats de notre application sont reportés sur la figure.37 et 38 ci-dessous;

Les hydrogrammes normés résultant ont mis en évidence des comportements spécifiques en termes de dynamique d'écoulement pour chaque bassin étudié.

La durée de la crue sur l'ensemble du bassin est de 2 à 3 jours, les bassins en altitude Béni-Bahdel et Khemis sont caractérisés par une durée courte aussi de l'ordre de 04 jours avec une protubérance à la fin de la décrue due probablement à la contribution des formations karstiques. On note aussi que les crues présentent des pics très pointus très instantanés traduisant par conséquent des crues très rapides.

Les bassins en plaine, en particulier celui de Zenata, sont caractérisés par une durée de 2 jours. Pour le bassin de Mouileh, on note des crues d'une durée de 4 jours avec une forme toujours pointue et des pics instantanés, cela signifie que ces régions sont le siège de crues, comme nous l'avons déjà signalé.

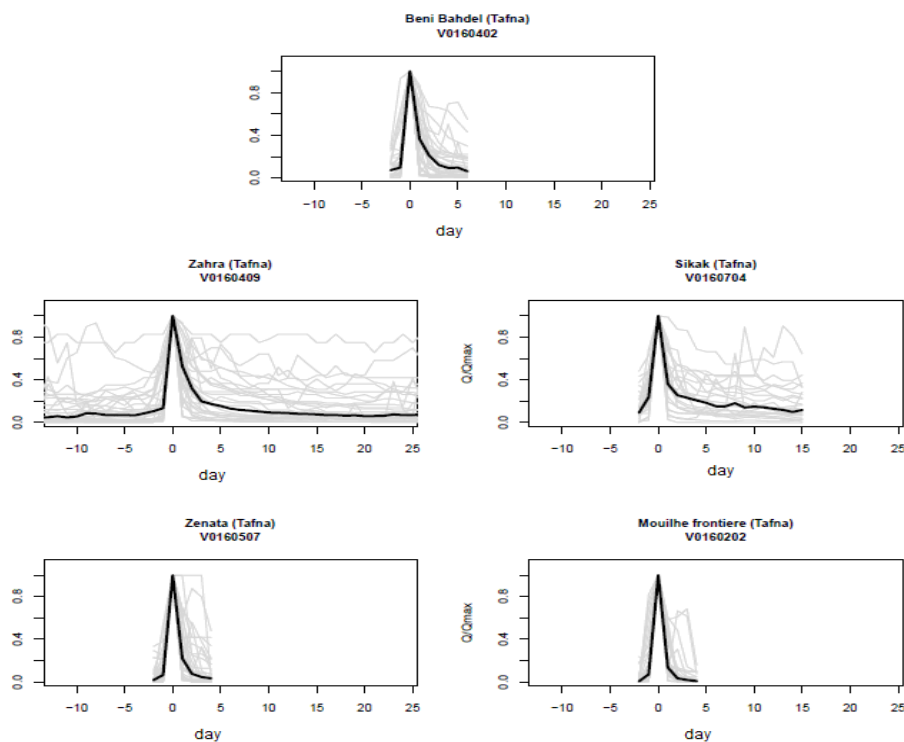


Figure. 37 Hydrogrammes normés extraits des sous bassins de la Tafna

Les hydrogrammes normés discutés plus haut, nous ont permis de mettre en évidence les zones les plus affectées par les crues importantes. Nous avons voulu rechercher quelles seraient les périodes ou les saisons les plus fréquentes de ces événements. Nous avons recensé un ensemble d'événement sur la période étudiée [1976-2006]. Il en ressort que le bassin contenant le plus d'événement est celui de Mouileh avec 24 événements intenses puis avec un degré moindre les bassins en altitude Khemis et Ben-Bahdel.

Deux saisons se distinguent au niveau de notre bassin (Figure.38):

La période d'automne représente la période de forts débits accompagnés de flux importants transitant exclusivement dans les bassins en plaine celui de bassin de Mouileh par exemple.

La période de printemps quant à elle, semble caractériser uniquement les bassins en montagne qui durant cette période, comptent un nombre plus élevé d'événements dû à priori à la fonte des neiges.

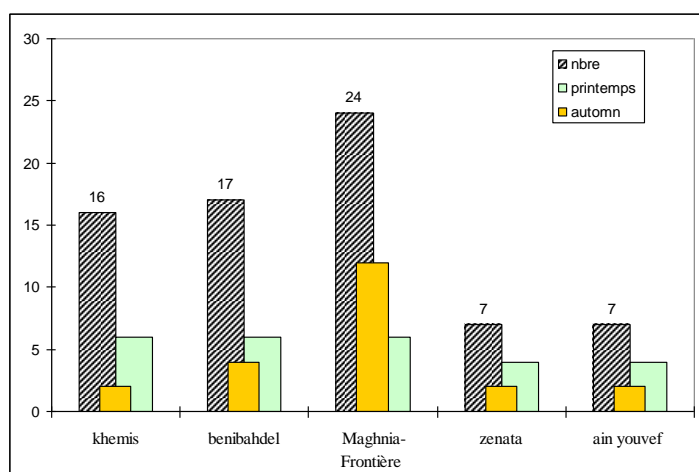


Figure. 38 variations saisonnières des événements extrêmes sur les sous bassins de la Tafna.

5- Ecoulements annuels et analyse des tendances/ruptures

La Figure.39 présente la distribution des débits moyens annuels (Figure. 39a) et débits spécifiques moyens annuels (Figure. 39b) pour les 5 stations sous forme de boîte à moustache. L'analyse des chroniques de débits montre que la variation des débits est plutôt homogène.

Il est facile de comparer les stations lorsqu'on regarde les débits spécifiques et on distingue alors aisément un contraste marqué entre les bassins d'altitude (Beni-Bahdel, Khemis, Sikkak) et les bassins de plaine (Maghnia_Frontière, Zenata). Les premiers ont un débit spécifique médian autour de $400 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, alors que pour les seconds, il se situe autour de $100 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

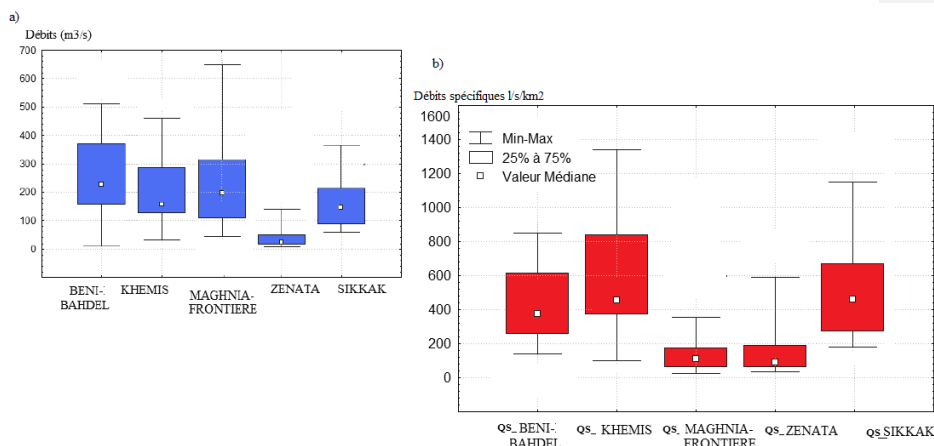


Figure. 39 (a) Distribution des débits moyens annuels pour les cinq stations débimétriques étudiées. (b) Même chose pour les débits spécifiques correspondants.

Pour mettre en évidence la différence des volumes écoulés sur les bassins en relief et ceux en plaine, nous avons analysé via le test de Wilcoxon-Mann-Whitney les chroniques des débits spécifiques moyens annuels aux seuils : 0.10, 0.05, 0.01,. Plusieurs combinaisons entre les doublets de sous-bassins en plaine et en altitude ont été effectuées. Les résultats du test montrent qu'il existe bien une différence significative entre les zones de plaine et d'altitude au seuil 5% pour tous les doublets des sous-bassins testés. L'analyse détermine aussi qu'il y a une certaine homogénéité concernant la distribution des écoulements sur les sous-bassins de même altitude, l'hypothèse H_0 , dans ces cas, peut être acceptée.

Sur les débits moyens annuels, le tableau 7 montre qu'il n'y a ni tendance ni rupture significative sur toutes les stations sauf celle de Béni-Bahdel qui présente une tendance à la baisse significative au seuil 1% et une rupture significative au seuil 10% en 1987 qui sont probablement causées par les transferts d'eau vers les grandes villes auxquels nous avons fait référence dans l'introduction II.

6- Débits de base et analyse des tendances/ruptures

Le Tableau 7 montre que 3 stations sur 5 ont des tendances à la baisse significative à 5% du débit de base. Il s'agit des stations d'altitude de Beni-Bahdel et Khemis, et de la station de Zenata. La Figure. 40 illustre cette tendance pour la station de Beni-Badhel. On observe aussi une rupture significative à 1% du débit de base pour les stations d'altitude de Beni-Badhel et Khemis situées respectivement en 1983 et 1991. La station de Sikkak présente aussi une rupture significative en 1982, ce qui peut être expliqué comme conséquence aux plusieurs prises d'eau faites depuis le barrage de Sikkak pour les retenues collinaires à l'intérieur du bassin.

Le test de Wilcoxon-MannWhitney appliqué pour comparer les doublets de chroniques de débits de base spécifiques entre les stations de plaine et d'altitude montre

une p _value significative au seuil de 5% traduisant des différences de distribution significatives entre les deux zones

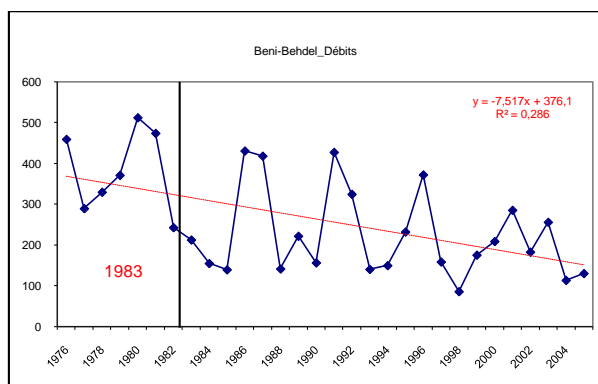


Figure. 40 Chroniques de débit de base moyen annuel pour la station de Beni-Bahdel.
La ligne représente la tendance linéaire ajustée.

7- Indice d'écoulement de base ou Base Flow Index (BFI) et analyse des tendances et ruptures

Pour les stations de plaine, les valeurs moyennes obtenues pour le BFI sont de 0.18 (Maghnia-Frontière) et de 0.31 (Zenata). Ces valeurs traduisent une faible capacité de stockage. En revanche, pour les stations d'altitude, on obtient des valeurs de BFI plus élevées : 0.62 pour Beni-Badhel et 0.57 pour Khemis et Sikkak 0.56. Ces valeurs sont importantes et reflètent ainsi la présence de stocks, dans des sous-bassins situés dans la zone à dominance karstique.

La Figure.41 présente les séries annuelles de BFI pour les stations de Maghnia-Frontière et Khemis, représentatives des stations de plaine et d'altitude respectivement. Dans les deux cas, on note une tendance à la baisse du BFI qui n'est significative au seuil 1% que pour la station de Khemis. En revanche, toutes les stations présentent une rupture significative au seuil 1 ou 5% selon les stations (Tableau 7) située entre 1984 et 1990 selon les stations, la cause serait probablement due à la forte sollicitation pour satisfaire le besoin en eau dans le bassin.

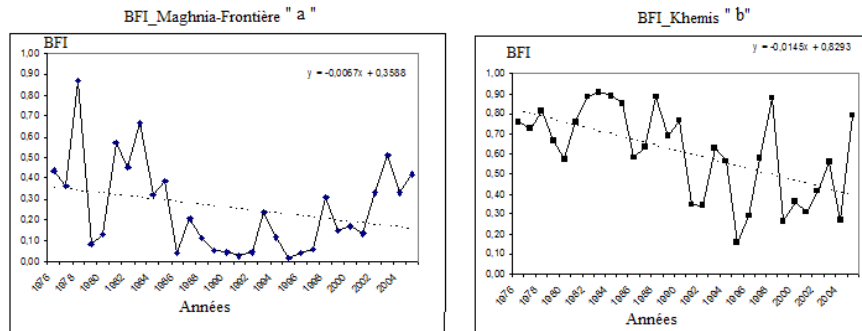


Figure. 41 Chroniques de BFI annuel pour les stations de (a) Maghnia-Frontière et (b) Khemis. Les lignes représentent les tendances linéaires ajustées.

L'application du test de Wilcoxon-Mann-Whitney sur les chroniques du BFI entre les doublets de stations montre que la différence est significative au seuil 0.05 entre une station de plaine et d'altitude.

	BASSINS		P	Q	QB	BFI	
			P_Value	P_value	P_Value	P_Value	
TENDANCE	Bassin en plaine	Maghnia-frontiere	0,415	0,643	0,707	0,615	
		Zenata	0,865	0,35	0.025** B	0,176	
	Bassin en relief	Khemis	0.455	0.059*	0.01** B	0.003*** B	
		Beni-Bahdel	0.634	0.007** B	0.016** B	0.205	
		Sikkak	0.377	0.942	0.45	0.25	
RUPTURE	Bassin en plaine	Maghnia-Frontiere	0.811	0.994	0.09	0.037** 1985	
		Zenata	1.18	0.775	0.122	0.04** 1986	
	Bassin en relief	Khemis	0.687	0.204	0*** 1991	0.002*** 1990	
		Beni-Bahdel	0.441	0.081	0.008*** 1983	0.019** 1984	
		Sikkak	0.991	0.276	0.02** 1982	0.003*** 1985	
	<p>P: Précipitations en mm. Q : Débits en m³/ s. QB: Débits de base en m³/ s. BFI: Indice d'écoulement de base. P_Value: Valeurs de la probabilité obtenue. ** à 5%, *** à 1% et * 10%. 1985: Année de rupture. B : Tendance à la baisse.</p>						

Tableau.7 Récapitulatif des calculs des ruptures et tendances sur le bassin de la Tafna

3-7 CONCLUSION du chapitre

A travers, ce chapitre, nous avons tenté de présenter une analyse des écoulements et des précipitations dans le bassin de la Tafna en les reliant aux causes qui pourraient les influencer. La grande superficie de ce système et la disponibilité de données sur plusieurs sous-bassins, nous ont conduit à le subdiviser en deux unités bien distinctes : une en zone de relief et la deuxième en zone de plaine. Classiquement, le bassin de la Tafna est subdivisé en trois zones ; la haute, la moyenne et la basse Tafna, mais cette subdivision classique ne s'est pas révélée pertinente pour notre étude. Le modèle numérique de terrain que nous proposons ainsi que les contrastes géologiques dont nous avons tenu compte, permettent d'identifier nettement deux parties sur lesquelles nous avons focalisé nos tests et analyses pour représenter le bassin de la Tafna.

L'analyse des données de pluie présentée dans ce travail confirme l'influence de l'altitude autrement dit, l'existence d'un gradient altitudinal dans le bassin. L'analyse des écoulements présente une sensibilité liée essentiellement à la présence

des formations karstifiées qui conduisent à des capacités de stockage de l'eau assez spécifiques.

On peut donc conclure que le bassin de la Tafna se compose de deux zones inégalement arrosées. Les apports les plus forts se situent dans les parties hautes du bassin alors que la pluviométrie est plus faible dans les zones de plaine. Cette répartition spatiale des pluies sur le bassin de la Tafna peut s'expliquer naturellement par l'influence d'un gradient d'altitude.

Le calcul du BFI, que nous avons réalisé sur les données de débits journaliers disponibles, s'est révélé très pertinent pour l'identification de la présence de stockages dans les sous-bassins étudiés. L'indice « BFI » prend des fortes valeurs pour les bassins qui sont formés essentiellement par les unités carbonatées karstifiées et diminue quand il s'agit des bassins à formations détritiques. Les écoulements de base deviennent de moins en moins importants vers les plaines. Dans ces zones seuls les volumes de crues sont enregistrés. Il semblerait que les sous-bassins ayant un faible BFI soient le siège d'écoulements rapides, ce que pourrait corroborer le fait que la majeure partie des formations géologiques dans ces zones ont un faciès peu perméables (Argiles et marnes du Miocène).

Les tendances déterminées ne sembleraient pas être liées uniquement aux précipitations comme on le pense souvent. Elles pourraient aussi être dues aux activités anthropiques très importantes dans la région voire à une modification de la couverture neigeuse quoique peu de travaux ont traité cette question. L'impact de l'activité humaine dans toutes ses dimensions, ne saurait être exclu comme seconde source de perturbation de l'écoulement dans le bassin de la Tafna. L'étude de modélisation pluie débit, qui sera présentée dans le chapitre suivant va nous permettre d'appuyer et de compléter les résultats discutés dans ce chapitre.

CHAPITRE IV

ClicCours.com

4- Evaluation du bilan hydrologique annuel du bassin de la Tafna par consolidation géostatistique et par modélisation pluie-débit

Ce chapitre a pour objectif l'évaluation progressive du bilan hydrologique du bassin de la Tafna, d'abord au pas de temps interannuel par une méthode géostatistique, puis en s'appuyant sur un modèle hydrologique conceptuel, spatialisé par sous-bassins. Cette seconde approche s'appuie sur la modélisation pluie-débit, pour laquelle on utilise une version semi-distribuée du modèle GR4J. Nous détaillerons sa calibration à partir des données disponibles, ainsi que les bilans hydrologiques qui en découlent. L'analyse de sensibilité sera présentée dans le chapitre V.

1- Généralités

Dans le chapitre-II, nous avons présenté une revue de l'utilisation de modèles pluie-débit sur des bassins algériens, en listant quelques exemples d'applications (Morrin (1991), Kabouya et Michel (1991), Dechemi et al(1994), et Yebdri et al (2007). Néanmoins, ce type de modèle reste assez peu utilisé dans les études hydrologiques menées sur le territoire algérien en général et le bassin de la Tafna en particulier. La faible disponibilité de séries de pluie et de débit nécessaires à leur mise en œuvre, ainsi que les incertitudes entachant les résultats obtenus, comme nous l'avons illustré dans le chapitre III, paraît pouvoir en partie expliquer cet état de fait. On notera aussi que les études antérieures, peut-être parce que elles étaient très focalisées sur leurs objectifs opérationnels et moins sur la démarche méthodologique elle-même, n'ont pas vraiment testé la robustesse de leurs modèles via des méthodes d'analyse de la sensibilité, telles que nous allons les introduire dans cette thèse.

Durant cette étude, nous nous sommes fixé comme objectif d'explorer la modélisation pluie-débit en prenant en compte l'hétérogénéité spatiale, la semi aridité, la faiblesse de la couverture des réseaux de mesures.... Nous voulions aussi obtenir une vision claire des possibilités et limites de tels outils dans le contexte de ce travail. Nous avons ainsi cherché à reproduire un fonctionnement du bassin qui soit le plus proche possible de la réalité. Ceci constituera un premier pas pour la mise en place de ces outils dans les bassins semi-arides algériens et nous permettra d'établir un premier diagnostic sur les pistes de progrès (renforcement du réseau de mesures, qualité des données, etc), qui permettraient de généraliser et fiabiliser leur utilisation.

Après une section où nous discutons le choix des outils retenus, le présent chapitre présente deux approches de complexité croissante visant à établir le bilan hydrologique de la Tafna.

1. La première approche s'appuie uniquement sur les données disponibles et les outils de la géostatistique pour évaluer les composantes du bilan (Ziqi et al., 2012).
2. La seconde approche s'appuie sur la modélisation pluie-débit.

Nous présenterons le modèle retenu dans cette étude : le modèle à pas de temps journalier GR4J (Perrin, 2000), dans une version semi-distribuée adaptée au calcul du bilan hydrologique (Ziqi et al, 2012). Nous détaillerons sa calibration et son

évaluation sur les données disponibles, ainsi que les bilans hydrologiques qui en découlent.

L'analyse de sensibilité des résultats du modèle aux paramètres est renvoyée au chapitre V.

Cette section nous permettra de présenter la mise en œuvre des outils proposés et d'évaluer leur efficacité et leur aptitude pour améliorer la connaissance du fonctionnement du bassin étudié.

2- Choix des outils retenus

Nous avons évoqué dans le chapitre précédent la complexité du bassin de la Tafna. Elle se manifeste par une distinction très nette entre les deux parties du bassin dont les caractéristiques ont été mises en évidence (Bakreti et al, 2012).

- La première en haute altitude englobe les sous bassins karstifiés, les plus productifs.
- La seconde, en plaine représente les sous bassins non karstifiés, les moins productifs.

La différence entre ces deux parties du bassin ne se limite pas aux aspects géologiques et morphologiques. On relève également un gradient altitudinal des précipitations, qui se répercute sur la ressource en eau disponible dans les différents sous-bassins de la zone étudiée.

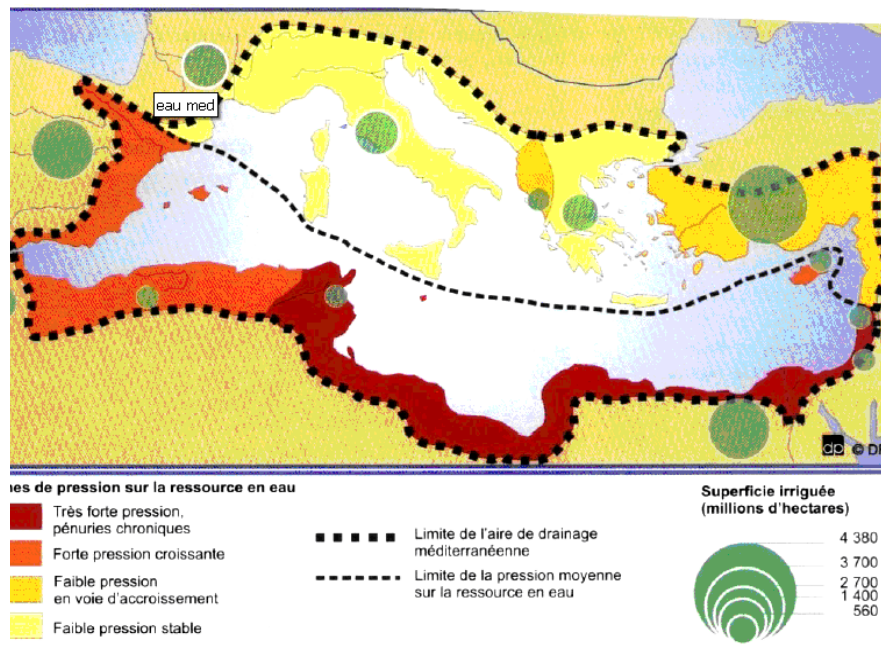


Figure.42 Pression exercée sur la demande en eau dans le bassin méditerranéen. Laborde et al. (2012)

Ceci dit, Le comportement du bassin étudié, en termes, de ressources en eau se calque sur le schéma général des bassins méditerranéens soumis au climat semi-aride. Ghenim et al (2003), Bakreti et al (2012) attestent que seules les zones en altitude du système de la Tafna constituent la réserve principale en eau de l'ouest algérien.

A cet effet, Nous nous sommes posé plusieurs questions en relation avec la méthodologie qu'on doit adoptée pour mieux connaître notre système, de type : Quelles seraient parmi les approches existantes celles qui seraient les plus compatibles avec notre système et nos objectifs ? Mais, avant le choix d'une approche, avons-nous les informations nécessaires pour se préparer et se lancer dans l'application d'une telle ou telle méthode ? Pour démarrer le travail à partir de base solide, nous avons, dans un premier temps, considéré les points suivants :

- Avoir une connaissance maximale de la nature du système, géologie, réseau hydrographique, pente,...
- Rassembler le maximum de données qui serviront à la modélisation hydrologique recherchée (Pluies, débits, Etp, températures, ...).
- Recenser dans la littérature, les travaux similaires au contexte du bassin étudié (ne serait ce que pour faire des comparaisons).

Notre recherche est dirigée vers des approches qui présenteront un compromis entre le peu de données dont nous disposons et la variabilité du bassin versant (que nous avons déjà mise en évidence). Notre recherche bibliographique nous a orienté vers une approche conceptuelle simple de type pluie/débit qui, seule, nous a paru adaptée au contexte du bassin. Nous avons décidé de faire appel à l'utilisation d'outils semi-distribués, seuls capables de prendre en compte la variabilité spatiale du bassin de la Tafna.

Pour orienter encore notre choix d'outils, nous avons ensuite considéré les points suivants :

- 1) Le modèle ou l'outil choisi doit garantir une bonne souplesse dans la manipulation des données (notre modèle exige peu de données d'entrée ce qui est préférable).
- 2) Une certaine liberté dans la manipulation de l'outil doit permettre de modifier si nécessaire ou recoder les traitements selon le degré de complexité du bassin ou les besoins (utiliser un modèle déjà maîtrisé représente déjà un pas vers de bon résultats).
- 3) Une aide au calage des paramètres recherchés, qui le plus souvent n'ont pas d'interprétation physique simple.
- 4) La possibilité de réaliser une analyse de sensibilité pour évaluer les erreurs influant les composantes du bilan hydrologique.

En nous appuyant sur ces critères, et en particulier le second, nous avons retenu deux approches développées par E. Leblois, avec lequel nous avons pu faire évoluer ses outils pour les adapter au contexte de la Tafna.

- La première approche s'appuie uniquement sur les données disponibles et propose par des méthodes de spatialisation géostatistique un autre type de bilan hydrologique (Ziqi et al, 2012). Outre son propre résultat, cette approche que nous détaillons dans ce chapitre est très pertinente et se présente aussi comme un premier moyen de vérification de la cohérence élémentaire des données pour une utilisation préalable d'une éventuelle démarche de modélisation.
- Une seconde approche fait appel à la modélisation pluie/débit de type semi-distribuée que nous allons expliciter à travers ce chapitre.

Ces deux outils ont été intégrés à un logiciel initialement conçu comme outil d'analyse à finalité hydrologique des modèles numériques de terrain (MNT) appelé HydroDem et développé par E. Leblois (Leblois, 1993 ; Leblois et Sauquet, 2008).

La section suivante décrit brièvement les principales sorties produites par Hydrodem et que nous avons utilisées dans notre travail.

3- Brève description des fonctionnalités du logiciel hydrodem

3-1 Le logiciel HydroDem

Hydrodem est un outil qui procède des SIG dont la particularité est de conjuguer aspect géométrique et traitement hydrologique. Il permet à partir d'un MNT de déterminer le plan de drainage, la correction des biefs, l'extraction des sous-bassins versants et d'un certain nombre de leurs caractéristiques morphologiques (surface, pente moyenne, altitude moyenne, etc..).

Le modèle GR4J a été intégré à cet outil comme fonctionnalité "orientée" hydrologie ce qui permet la restitution des résultats sous forme de cartes thématiques (carte de drainage, carte des pentes,...). La figure ci-dessous présente l'interface d'Hydrodem lors du traitement du bassin de la Tafna. Un onglet est réservé au traitement hydrologique sous GR4.

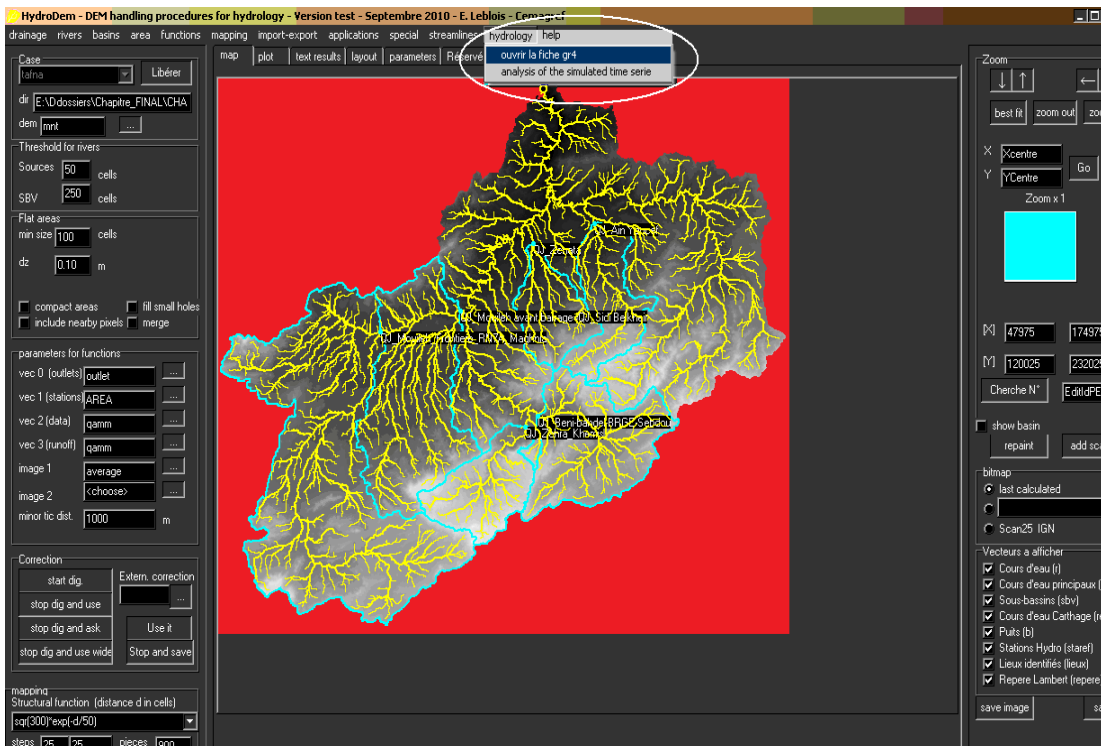


Figure. 43 Représentation de l'interface d'HydroDem

Plusieurs travaux se sont appuyés sur l'utilisation d'HydroDem (Cf. Annexe-1). Tous supposent la construction d'un plan de drainage exhaustif, permettant une appréhension cohérente des talwegs (cours d'eau) et de leurs versants. De tels plans de drainage ont également servi de support à des modélisations hydrologiques plus ou moins complexes comme dans les travaux de Habets et al. (1999). En annexe 1, nous présentons une liste des travaux s'appuyant pour tout ou partie sur les fonctionnalités du logiciel HydroDem.

3-2 -Exemple de cartes dérivées d'HydroDem

Dans cette section, nous avons jugé utile de décrire certaines cartes dérivées du MNT et proposées par HydroDem. Elles représentent des éléments intermédiaires de structuration spatiale du bassin. Leur utilisation pour produire des cartes consolidées de bilan est présentée dans la section suivante.

a- Carte des sous bassins

Le traitement de l'information sous HydroDem est semblable à celui qu'on retrouve dans les outils SIG de type raster. Il a l'aptitude à traiter des modèles numériques de terrain.

Le MNT de la Tafna a été en premier lieu généré sous Map-Info puis comparé à celui extrait de la base SRTM, acronyme de Shuttle Radar Topography Mission, (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), dont le MNT à 3" d'arc a été reprojeté et traité avec la méthode *Rho4* dans le logiciel HydroDem afin d'en extraire le réseau hydrographique (Leblois, 2008) (cf chapitre II).

La figure, ci-dessous, présente le bassin de la Tafna après vérification du plan de drainage, notamment le raccord amont-aval des biefs et l'emplacement des stations hydrométriques et pluviométriques. Ce support permet l'identification des sous bassins des stations étudiées, au sein du bassin de la Tafna dans son ensemble.

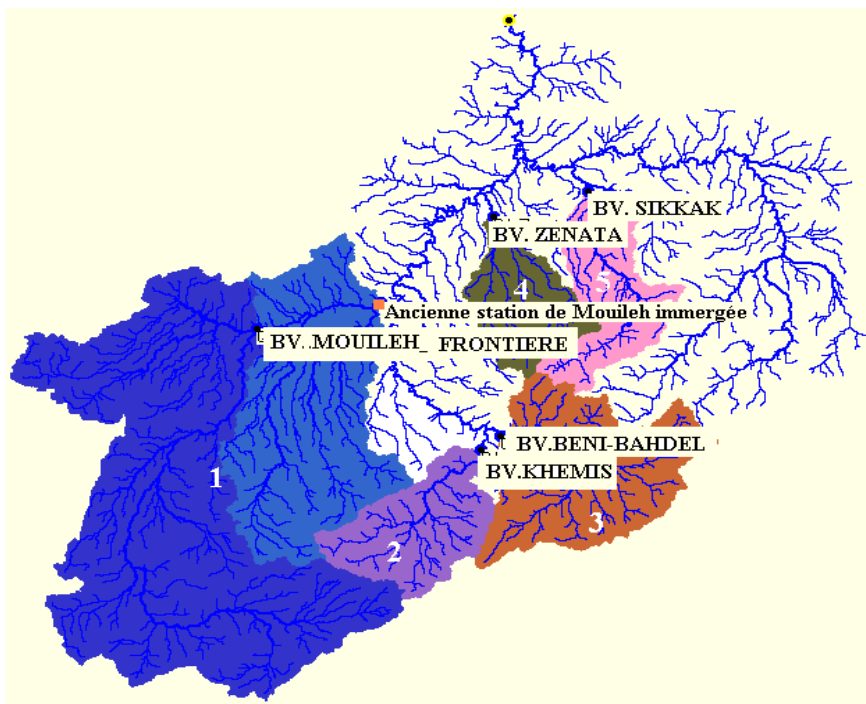


Figure 44 Carte des sous bassins vu à travers HydroDem

b- Carte de drainage

L'une des principales caractéristiques d'HydroDem est de permettre la création des plans de drainage utiles à la modélisation. Le logiciel est muni d'un algorithme de calcul des plans de drainage (figure45) par la méthode *Rho4* (Leblois, 2008).

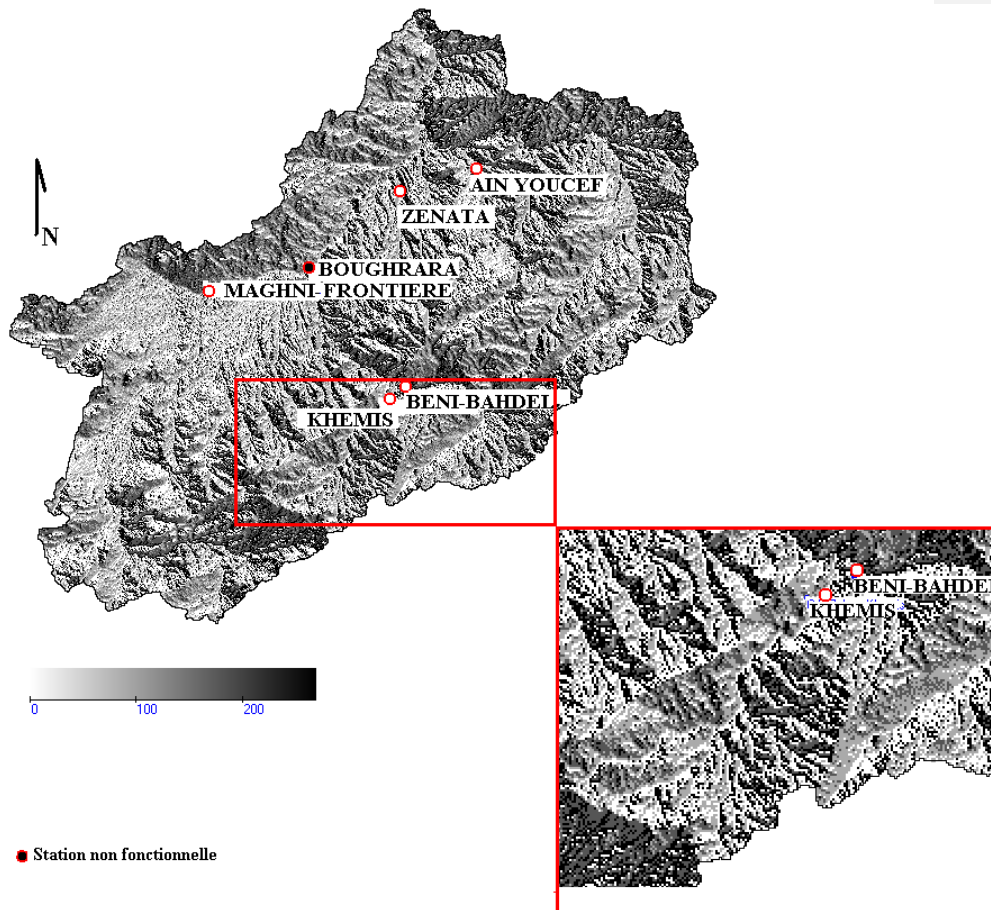


Figure 45 Représentation de la carte de drainage final restitué sous HydroDem 0 : Nord ; 90 : Est ; 180 : Sud ; 270 : Oues

Dans cet algorithme le sens de l'écoulement d'une maille du raster est déterminé par la différence d'altitude entre cette maille et ses quatre voisines (ouest, est, sud, nord). Dans le cas où la direction d'écoulement est une direction cardinale intermédiaire, la direction d'écoulement est tirée au sort, permettant sur un versant une direction de drainage correcte en moyenne.

La figure 46 montre l'orientation de quelques mailles et comment ces mailles coopèrent pour définir un cours d'eau élémentaire.

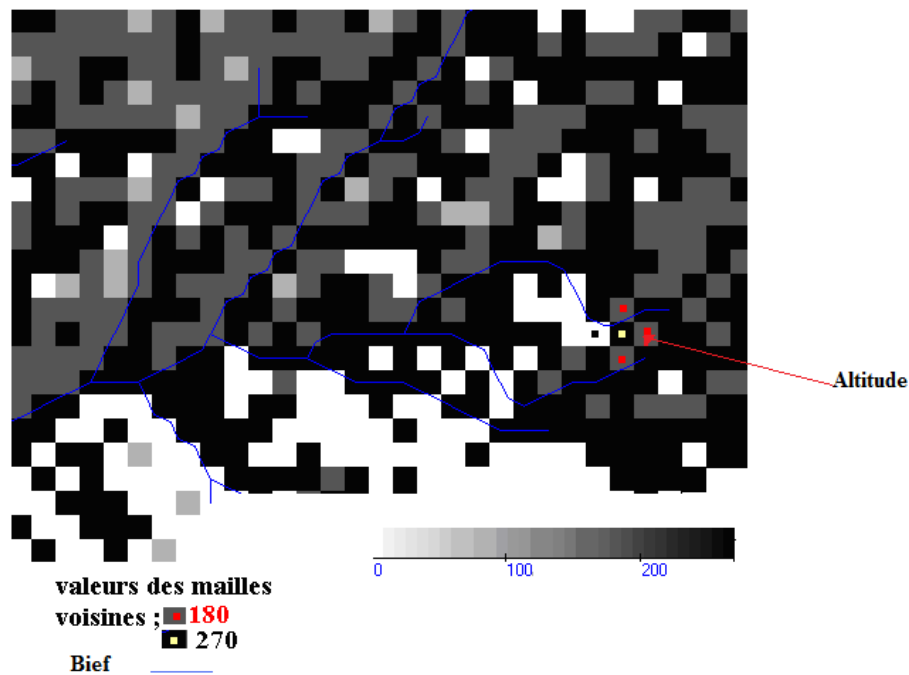


Figure.46 Sens de l'écoulement dans le plan de drainage d'Hydrodem

L'eau en s'écoulant d'une maille à une autre emprunte le chemin vers l'altitude la plus basse qui correspond au sens de l'écoulement à travers lequel la pente et la surface des mailles drainées seront déterminées. Des problèmes de minima locaux peuvent être signalés pouvant apparaître dans le cas de mailles ayant la même altitude. Hydrodem s'efforce de les résoudre automatiquement en reconnectant le minimum local vers un aval plus marqué. S'il échoue, le tracé du bief est interrompu et le cas est porté à l'attention de l'utilisateur qui a la liberté d'imposer une direction selon une logique hydrologique issue d'une comparaison ou d'une étude effectuée sur le terrain.

c- Carte de distance par rapport à l'exutoire

Cette carte constitue un outil important du point de vue hydrologique. Elle renseigne sur la distance spatiale qu'aurait à parcourir l'eau à travers le système depuis son point le plus haut (amont) vers le point le plus bas (exutoire), selon le schéma de drainage, figure 47.

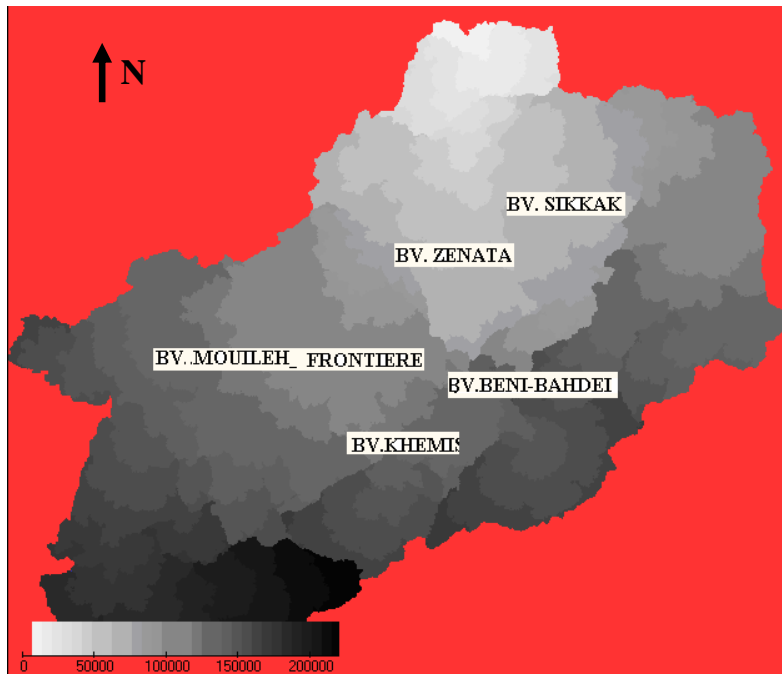


Figure.47 Carte de la distance jusqu'à l'exutoire

Les illustrations ci-dessus ne sont que les plus importantes parmi un nombre important de cartes et graphiques que l'on peut générer sous HydroDem au prix de manipulations parfois malaisées.

Les fonctionnalités que nous avons le plus exploitées sont celles relatives à la consolidation des bilans hydrologiques et la modélisation avec GR4j_semi-distribué. '

4- Evaluation préliminaire du bilan hydrologique dit bilan consolidé

Les résultats présentés dans cette section constituent, rappelons-le, une première estimation du bilan hydrologique de la Tafna obtenu uniquement à partir de l'analyse des données ponctuelles disponibles. Ce bilan est obtenu directement à l'échelle interannuelle par l'utilisation d'outils géostatistiques contraints au respect de principes de base suivants :

- * L'eau doit s'écouler de l'amont vers l'aval
- * Le bilan hydrologique doit être fermé

Cette technique dite aussi du bilan consolidé a été utilisée avec succès par Yan et al. (2012) sur un bassin versant chinois. Sa mise en œuvre consiste à :

- Interpoler sur une grille régulière les composantes du bilan hydrologique (P, Q, E) de manière indépendante à l'aide des techniques de la géostatistique (Yan et al., 2012). Ces interpolations, dont le détail varie selon la variable considérée, s'appuient sur la méthode du krigeage et fournissent outre la carte d'estimation, pour chaque variable, une carte de variance d'estimation utilisable comme incertitude relative à l'estimation des valeurs ponctuelles de chaque composante. Nous détaillons les méthodes retenues pour chaque variable dans la suite de ce chapitre
- la consolidation du bilan est ensuite obtenue à partir de l'équation du bilan hydrologique $P-Q-E=0$. En chaque point, et en tenant compte de l'incertitude affectant chaque terme, on calcule la correction à appliquer sur chaque composante, pour que le bilan hydrologique soit bouclé.

La démarche peut être succinctement résumée par la figure 48 :

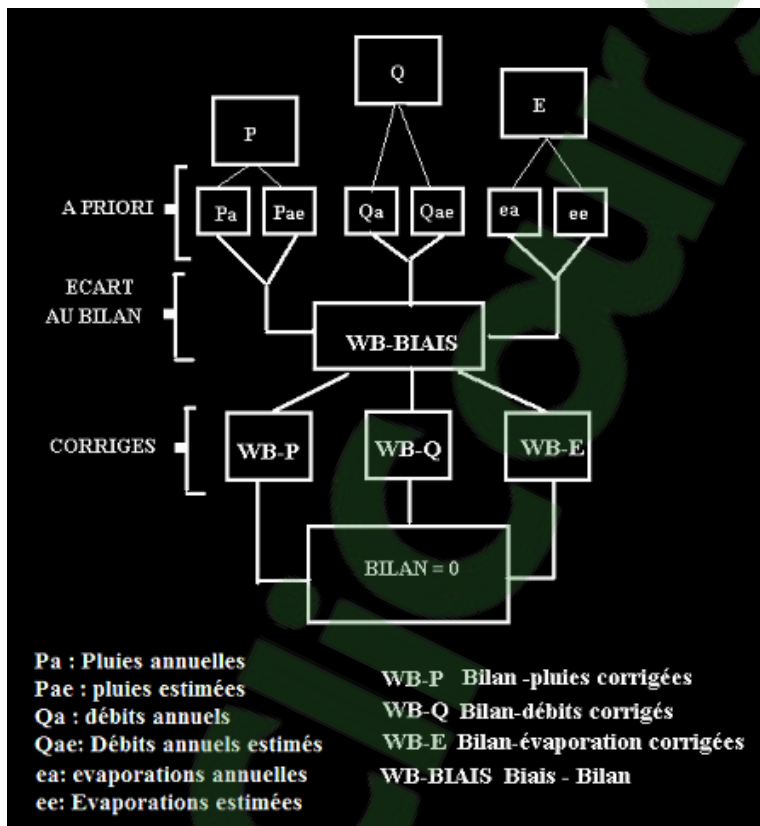


Figure. 48 Schéma général du concept du bilan consolidé appliqué au bassin de la Tafna.

Du point de vue des équations :

Chaque élément du bilan est considéré comme une variable aléatoire gaussienne X_i , d'espérance mathématique inconnue μ_i et d'un écart type connu σ_i .

Formellement, on écrit :

$X_i \in N(\mu_i, \sigma_i)$ où X_i désigne les valeurs exactes dans l'équation du bilan:

$$\mu_p + \mu_e + \mu_q = 0$$

soit

$$\sum_i \pi_i \mu_i = 0$$

où π_i : désigne les coefficients de la variable X dans l'équation du bilan.

Les X_i étant considérés comme indépendants, la probabilité conjointe de X_1, X_2, X_3 est de la forme

$$F_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = \prod_i \frac{1}{2\pi\sigma_i} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2} = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^n \frac{1}{\prod \sigma_i} e^{-\frac{1}{2}\sum \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2}$$

La maximisation de cette quantité sous contrainte de bilan amène à minimiser :

$$\sum \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 - 2L(\sum \eta_i \mu_i - 0), \text{ par rapport à } \mu_i \text{ et au multiplicateur de Lagrange } \underline{L}.$$

Ce qui va donner :

$$\begin{cases} \frac{2\mu_i}{\sigma_i^2} - \frac{2x_i}{\sigma_i^2} + 2L\eta_i = 0; i = 1, \dots, 3 \\ 2\sum \lambda_i \mu_i = 0 \end{cases}$$

Les estimations corrigées des termes du bilan sont données par :

$$\mu_i = x_i - \frac{\eta_i \sigma_i^2 \sum_{k=1}^n \eta_k x_k}{\sum_{k=1}^n \eta_k^2 \sigma_k^2} = x_i - \varepsilon_T \frac{\eta_i \sigma_i^2}{\sum_{k=1}^n \eta_k^2 \sigma_k^2}; i = 1, \dots, 3$$

Dans ce qui précède, les termes du bilan (pluies, évaporation et écoulements) sont exprimés en lames d'eau écoulées. Cependant, une fois la consolidation terminée, les flux d'écoulement peuvent être réintégrés sur des territoires pour former des évaluations de la ressource ou sur les bassins pour former une évaluation de la lame d'eau de bassin et donc du débit interannuel.

4-1 Paramètres du bilan consolidé

Cette étape a porté sur les différents termes en respectant les conditions *a priori* du bassin. L'évaporation a été obtenue de la façon la plus simple possible. Les débits qui

représentent l'écoulement total au niveau de chaque sous bassin ont été obtenus par spatialisation à travers les méthodes de krigeage. Pour les précipitations, une correction intégrant un gradient altitudinal a été jugé judicieuse pour tenir compte de cet effet majeur induisant une disparité spatiale en fonction de l'altitude.

Dans la partie suivante, on discute les différentes étapes entreprises pour la préparation des termes *a priori* du bilan consolidé.

1-Interpolation et correction des précipitations

Nous avons vu qu'il était plus judicieux de dresser une carte de pluie annuelle en intégrant le gradient adiabatique puisque les précipitations au niveau de la zone étudiée sont réparties en fonction de l'altitude. Ce paramètre est responsable du contraste dans la répartition des quantités de pluies recueillies dans les différentes parties du bassin.

A cet effet, nous avons croisé la carte des pluies avec les altitudes en recourant au krigeage à dérive externe (Castellier, 1993) ; Cressie,1993) dont la fonction est implémentée sous HydroDem.

Le krigeage à dérive externe nécessite la présence de deux informations :

- 1- Une information relative à la **variable d'intérêt**, connue en certains points. Dans notre cas, il s'agit de la mesure de pluie, disponible au niveau des cinq stations.
- 2- Une information spatialement exhaustive, statistiquement influente sur la variable d'intérêt, représentée ici par l'altitude Z extraite du MNT. Cette variable est dite variable de **dérive externe**.

Le principe de la technique est résumé, ci-dessous;

Soient Z une fonction aléatoire dont on connaît les valeurs en certains points de l'espace x_α et F fonction déterministe connue en tout point x de l'espace ;

On pose

$$Z(x) = Y(x) + d(x)$$

qui définit Z comme la somme d'un résidu Y et d'une dérive d .

Y est une fonction aléatoire stationnaire d'ordre 2 (d'espérance nulle et de fonction de covariance $C(h)$) : on aura,

$$E[Y(x)] = 0$$

Et

$$Cov(Y(x+h), Y(x)) = C(h), \forall x, h$$

Et

$$d(x) = aF(x) + b \text{ avec } a, b \text{ des coefficients inconnus}$$

Z vérifie donc la relation :

$$E[Z(x)] = aF(x) + b, \forall x$$

$$Cov(Z(x+h), Z(x)) = C(h), \forall x, h$$

La figure 49, ci-dessous, représente la carte obtenue par krigeage à dérive externe calculée sous HydroDem pour estimer la répartition de la pluie en tout point du bassin de la Tafna.

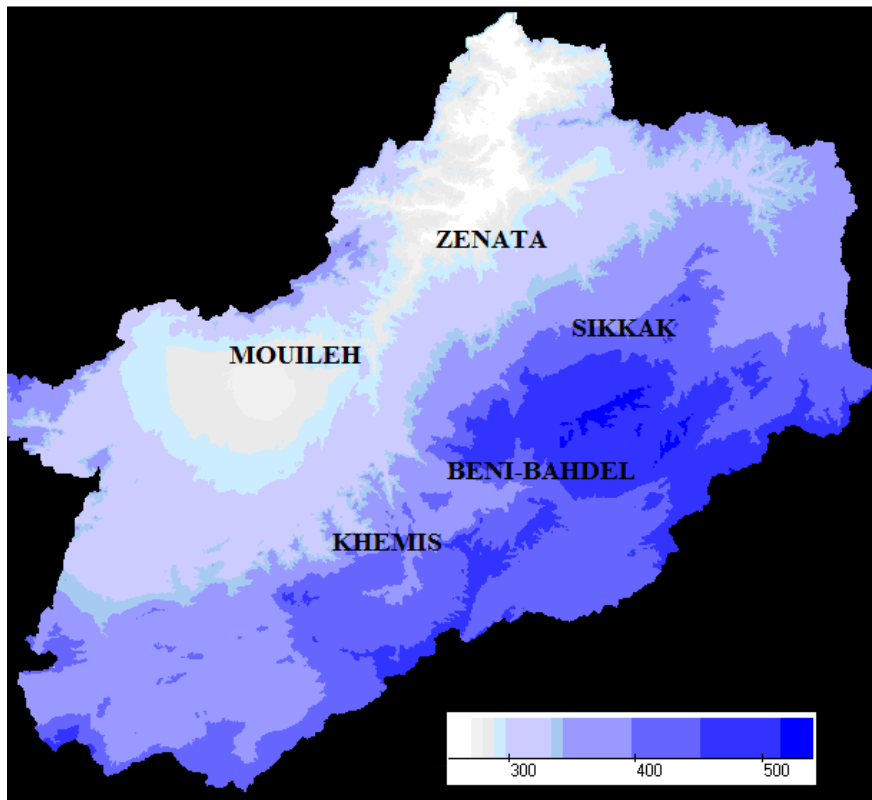


Figure.49 Carte des pluies moyennes interannuelles (mm) obtenues par krigeage en dérive externe du bassin de la Tafna

La répartition des pluies se fait effectivement en fonction de l'altitude au niveau du bassin. On constate que les zones les plus arrosées sont les zones d'altitude Beni-bahdel, Khemis à contrario celles en plaine, Mouileh et Zenata sont moins arrosées. Il reste cependant à signaler que la partie aux frontières du bassin (partie à l'extrême droite) n'est pas bien représentée du fait qu'on ne dispose pas de pluviomètre dans le territoire marocain (Oujda).

Nous avons voulu confirmer cet état par un examen de la couverture spatiale des stations pluviométriques sous HydrDem.

Les étapes de cet examen sont les suivantes ;

- Produire une carte du réseau de mesures
- évaluer l'espace couvert par les pluviomètres.

Pour ce faire, nous avons utilisé deux informations : le MNT de base et la position des stations sur chaque sous bassins. Nous avons ainsi pu générer la carte de la variance d'estimation qui est reportée sur la figure 50. Cette carte montre que les postes de mesures couvrent un espace limité et que toutes les zones à couleur foncée représentent les parties du bassin où l'information pluie n'est pas couverte par la station (donc absente sur la carte). En complément, nous avons représenté cette carte en dérive externe en intégrant l'altitude. La carte résultante montre bien l'extension spatiale de la surface couverte par chaque pluviomètre sur chaque sous bassin.

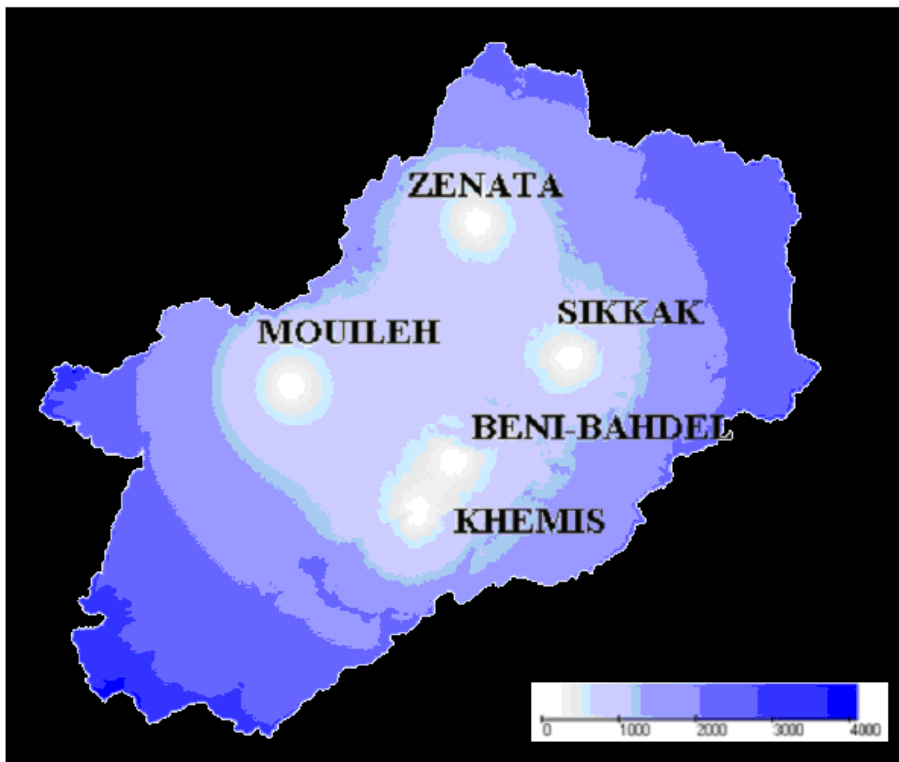


Figure.50 Variance de l'estimation ponctuelle des pluies en mm, d'après le krigeage à dérive externe.

Les systèmes où la mesure est bien couverte sont ceux dont la surface du bassin est moyenne (Khemis et Beni-Bahdel). Pour les autres bassins comme celui de Mouileh, la station assure la couverture uniquement des parties à proximité de l'instrument. Les données disponibles semblent insuffisantes pour bien représenter le domaine au-delà de la frontière algéro-marocaine. La marge Est du bassin de la Tafna est également mal couverte faute de disponibilité de stations.

2-Interpolation des débits et de l'évaporation

a- Spatialisation de la donnée débit

La donnée débit qu'on se propose de spatialiser est la partie la plus délicate. On veut en effet estimer une valeur qui est connue par sa moyenne au niveau de chaque bassin jaugé et non pas ponctuellement sur chaque points de la grille MNT. Le recours à ce genre de procédure n'est pas habituel mais a été étudié par Arnell (1995), Gottschalk (2011) et finalement Leblois (2012). La procédure adoptée ici consiste à faire un krigeage bassins-vers-point à *contrario* du krigeage point-bloc. L'écoulement ponctuel sur chaque maille du bassin y est estimé à partir des valeurs moyennes observées sur les bassins. L'information disponible qui est la moyenne des débits au niveau de chaque sous-bassin sera désagrégée par l'algorithme de krigeage bassin-vers-point sur l'ensemble du système Tafna.

La méthode est bien expliquée dans le travail de Leblois(2012), elle consiste à réaliser une interpolation moyennant la résolution du système de krigeage ordinaire.

Dont le principe est le suivant :

Soit A_i le i -ème bassin qui est pris selon l'importance de ses propriétés et x_0 un pixel quelconque du domaine dont on voudrait connaître l'écoulement.

On cherche à estimer la valeur au point x_0 (représentant un pixel quelconque du système) selon la formule suivante:

$$Z_{x_0} = \sum_i \lambda_i Z_i$$

En appliquant les contraintes de non biais et de minimisation de la variance d'estimation, le système de krigeage s'écrit :

$$\begin{bmatrix} Cov(A_i, A_j) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_i \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cov(A_i, x_0) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Avec les notations :

$$Cov(A_i, A_j) = E(Cov(x \in A_i, y \in A_j)) = \frac{1}{A_i} \frac{1}{A_j} \int_{x \in A_i} \int_{y \in A_j} Cov(x - y) dy dx$$

et $Cov(A, x_0) = E(Cov(x \in A, x_0)) = \frac{1}{A} \int_{x \in A} Cov(x - x_0) dx$ (hypothèse de stationnarité de second ordre)

La covariance du processus ponctuel est choisie en fonction des données et s'écrit :

$$Cov(d) = \sigma^2 \exp(-d/L)$$

avec L = longueur de corrélation qui vaut 100 km et $\sigma = 350$ mm/an.

Le système d'estimation du krigeage donne la valeur estimée Z :

$$Z_{x_0} = \sum_i \lambda_i Z_i$$

et sa variance d'estimation : $\sigma_{Z_B}^2 = \sigma^2 - \sum_i \lambda_i Cov(A_i, x_0) - \mu$

où μ est le multiplicateur de Lagrange choisi de façon à assurer la minimisation de la variance d'estimation sous contrainte de non biais⁸).

La figure, ci-dessous représente le résultat du krigeage bloc-point. On notera que la carte de la variance de la lame d'eau ponctuelle (figure 51-B) montre que les valeurs les plus faibles ne se situent pas au niveau des stations mais au centre des bassins contrôlés. La variance est plus forte ailleurs, notamment pour les parties du bassin de la Tafna les plus proches de l'exutoire, où nous ne disposons pas de mesures.

L'illustration ci-dessus prend pour argument d'application le bassin de la Tafna. Elle permet de donner un résultat typique de ce krigeage bloc-point, estimant à partir des données de débit l'écoulement ponctuel sur les mailles d'un raster fin, ici de résolution kilométrique. A gauche la carte de la production locale, qui évolue graduellement dans l'espace. La variance, à droite, n'est égale à zéro nulle part, ce qui est logique puisque les valeurs estimées ne coïncident pas avec des mesures disponibles. La variance apparaît moindre, donc la production mieux connue, non pas aux points de jaugeage mais entre ces points de jaugeage quand ces points sont resserrés et vers le centre au niveau des zones contrôlées par les stations.

| $L(\lambda, \mu) = \sigma_{Z_s}^2 + 2\mu(\sum \lambda_i - 1)$

⁸ Lagrangien de la forme quadratique :

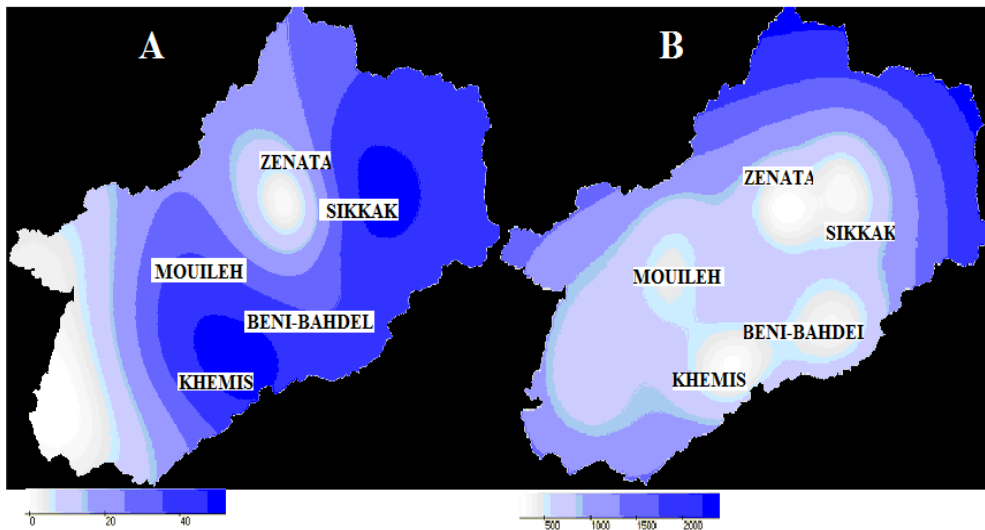


Figure.51 Bassin de la Tafna ; interpolation de la production ponctuelle d'écoulement à partir des débits interannuels par krigeage bloc-point ; A) gauche l'estimation en mm, B) droite la variance de cette estimation en mm²

La carte fournie, entre autres, les valeurs de l'écoulement sur le bassin qui vont de 0 à 40 mm/an (Figure 51A et B). L'incertitude est forte au niveau de la limite occidentale qui contribue très peu à l'écoulement à contrario de la limite orientale qui contribue quant à elle le plus mais, vu le nombre insuffisant de stations dont nous avons disposé, cette partie demeure pour notre étude la moins renseignée en termes de comportement de l'écoulement.

b-Spatialisation de l'évaporation

L'estimation de l'ETR est réalisée le plus souvent par les méthodes classiques (Turc, Thornthwaite, ...). Ces méthodes supposent souvent que le climat est suffisamment humide pour que l'ETR ne soit pas significativement différente de l'ETP. Dans le contexte Chinois, Yan et al. (2012) ont employé une estimation basée sur une ETR dépendant de la pluie et de l'ETP (Pike, 1964). Il est difficile, à la vérité, de s'assurer de l'indépendance de l'estimation de l'ETR et de la pluie.

Ici, on a procédé de façon plus simple encore : constatant les valeurs de P et Q en deux points du bassin de la Tafna correspondant aux deux zones distinguées précédemment (dans les montagnes et dans la plaine), il a été décidé de prendre P-Q en ces deux points comme point de base d'une estimation de l'ETR fonction de l'altitude seule.

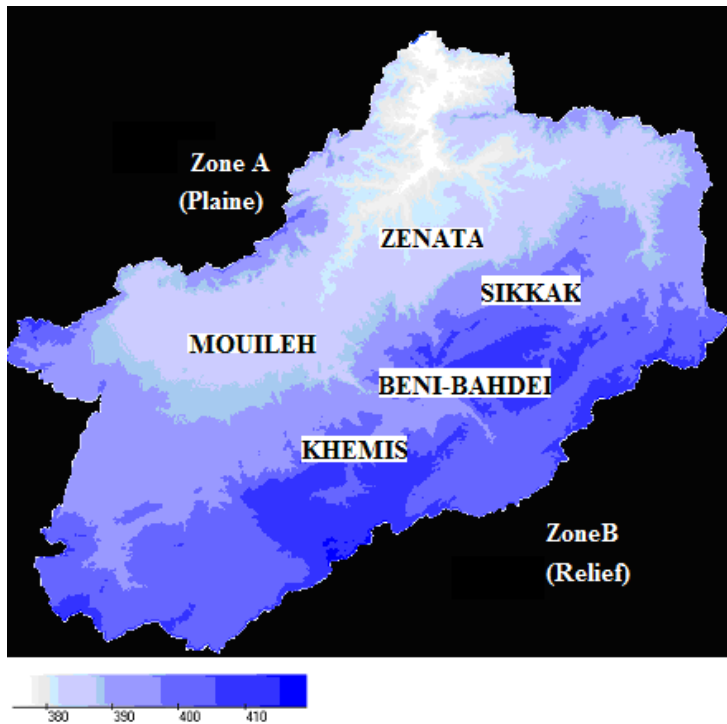
Point	Z(Point)	ETR(Point)
A	200 m	380 mm

B	1000 m	400 mm
---	--------	--------

Tableau.8 Spatialisation de l'évapotranspiration

L'incertitude a été considérée en prenant pour la variable un CV de 0.5.

L'estimation de l'ETR est donc définie ici *a priori*. La figure 52 représente cette estimation *a priori* de l'évapotranspiration qui est donc cartographiée avec une méthode beaucoup plus simple que pour les autres termes du bilan.

Figure.52 Estimation *a priori* de l'évapotranspiration. Noter l'empreinte du relief.

4-2 Bilan consolidé

Pour l'établissement du bilan consolidé, une carte de biais sur le bilan a été générée comme première appréciation de la qualité des estimations effectuées par les algorithmes statistiques employés. Après correction des différents termes du bilan par l'algorithme présenté précédemment, la carte du bilan correspond au final à un bilan bouclé (nul) (voir Figure.53).

Les précipitations annuelles dans le bassin indiquent des zones bien couvertes et des zones à précipitations presque nulles, comme c'est le cas de la partie d'Oujda. Cette zone du bassin reste bien sûr très incertaine faute de mesures locales.

Les cartes d'évapotranspiration réelle *a priori* et corrigées indiquent, puisque c'est notre hypothèse de base, que les zones de relief évaporent plus que les zones en plaine. Ceci peut sembler contre-intuitif aux lecteurs peu familiers des zones semi-arides. En climat tempéré plus humide, l'ETR est plus forte en plaine en raison de températures plus élevées en plaine qu'en zone de relief. La raison en est qu'en climat semi-aride, la disponibilité de l'eau est le facteur limitant.

L'écoulement global sur le bassin est relativement faible, variant selon les endroits de 0 à 50 mm/an.

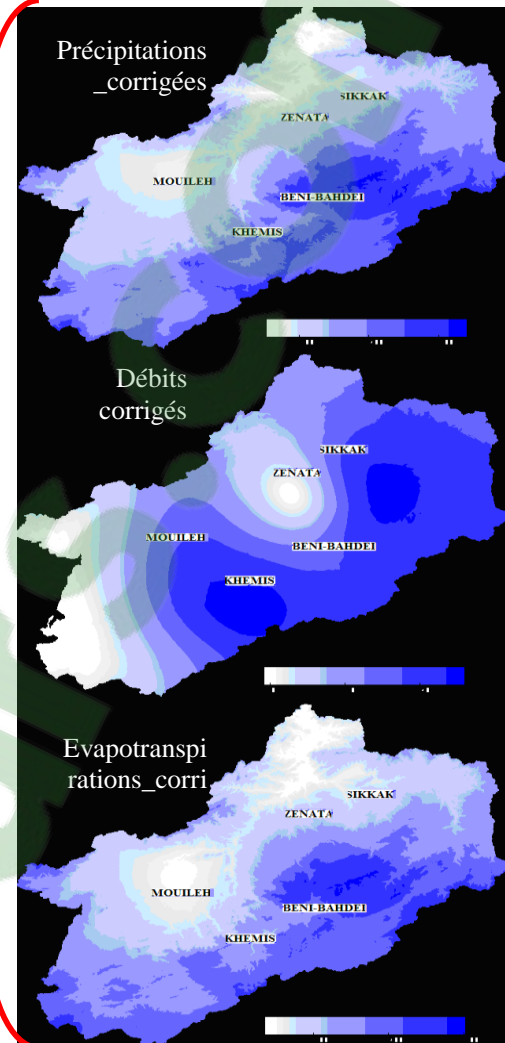
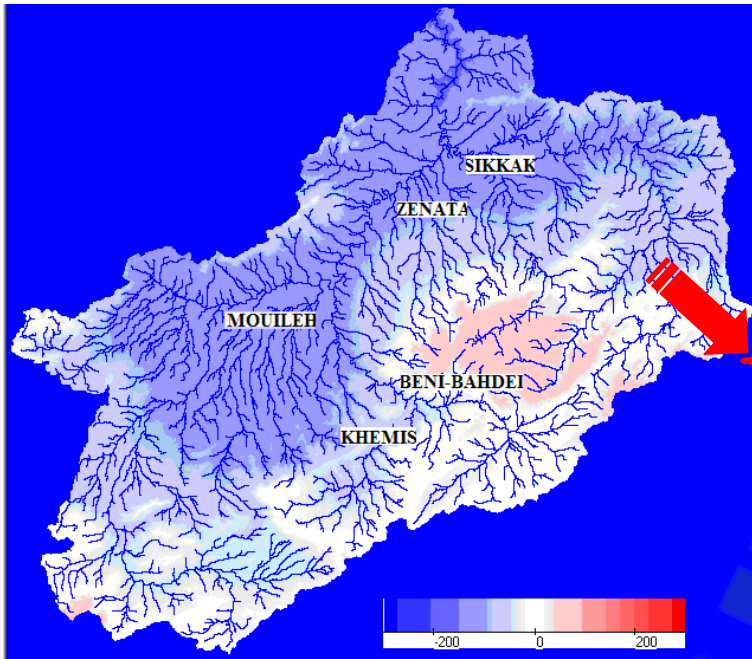
Pour la mise en évidence du bilan consolidé, une carte de biais sur le bilan a été générée comme première appréciation de la juxtaposition et du calibrage effectués par les algorithmes statistiques employés. La carte du bilan correspond en final à un bilan bouclé (nul) figure 53.

Les précipitations annuelles dans le bassin étudié, indiquent des zones bien couvertes et des zones à précipitations presque nulles comme c'est le cas dans une partie de la région d'Oujda. Cette zone du bassin reste bien sûr très incertaine faute de mesures locales.

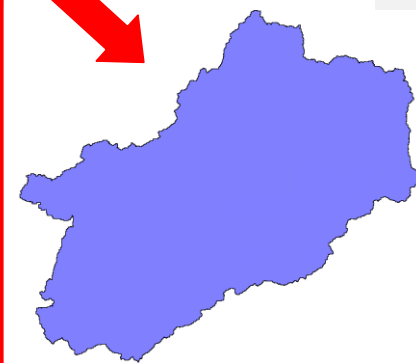
La technique que nous venons de présenter apparaît aussi comme un moyen de critique de données, montrant les zones manifestement peu couvertes par un réseau de mesures et les éventuels problèmes de cohérence générale. Très simple à mettre en œuvre, elle apparaît un préalable utile à la modélisation spatialisée.

Figure.53 Consolidation du bilan hydrologique sur le bassin versant de la Tafna. De haut vers le bas la pluie, l'écoulement, l'évapotranspiration

Biais sur le bilan



Bilan consolidé = 0



4-3 Présentation du modèle pluie-débit utilisé : GR4j semi-distribué

Le modèle que nous avons utilisé fait partie de la famille des modèles GR, il a été proposé dans le cadre de cette étude par Leblois. Dans cette adaptation semi-distribuée, GR4 est encore en amélioration continue, son concepteur l'adaptant encore à chaque fois en fonction de la thématique particulière.

Dans le cas de notre étude, différentes étapes de codages spécifiques ont été nécessaires, s'apparentant pour les unes au traitement des corrections rendues nécessaires par les difficultés signalées au chapitre III sur la qualité des données pluviométriques initiales, pour les autres à l'évolution de nos connaissances sur ce bassin, tout au long de l'étude. La thèse a été aussi l'occasion d'améliorations significatives quant aux capacités techniques et de rendu du code, que ce soit sur les termes principaux du bilan hydrologique ou pour l'élaboration des graphes d'incertitude qui seront employés au chapitre suivant.

La structure générale adoptée dans la version choisie est identique à celle de GR4J connue (Perrin, 2000). Dans la version utilisée dans ce travail, tous les termes du bilan hydrologique sous-tendu par GR4J sont explicités, en particulier celui de l'évapotranspiration qui n'est pas exploité dans la version originale, centrée sur la simulation des débits ; la fermeture du bilan hydrologique a été également imposée et vérifiée (Détail en Annexe2).

Par ailleurs, cette version du modèle est semi-distribuée. Ceci a nécessité l'ajout d'un module de routage. Sous les hypothèses générales de la théorie de l'hydrogramme unitaire, remarquons immédiatement que la courbe de restitution en un point aval d'une contribution unitaire apportée au réseau hydrographique par un sous-bassin s'apparente à une distribution de probabilité (sommant à un). L'équation de l'onde diffusante, à partir du noyau d'Hayami (Moussa, 1996), apparaît comme une paramétrisation de cette distribution de probabilité en fonction d'une distance à parcourir. Cette distribution aura deux paramètres qui sont la vitesse de propagation ou célérité notée C et la diffusivité notée D . Ils sont directement reliés à la dynamique de propagation de la crue le long d'un talweg

Cette équation ajoute deux paramètres supplémentaires aux 4 paramètres habituels. Notons cependant qu'à la différence des paramètres adoptés pour les modèles GR4 eux-mêmes (fonction de production), qui peuvent varier de sous-bassin en sous-bassin, les paramètres de la fonction de routage ont été considérés comme constants pour l'ensemble du bassin de la Tafna.

En principe, une modulation devrait être possible selon les pentes, selon les principes de l'hydrogramme unitaire géomorphologique. Les temps de transfert dépendent également des rugosités, peut-être liées au faciès lithologique. En l'absence de données hydrologiques à pas de temps plus fin que journalier, ce genre de raffinement est gardé en perspective.

On notera que la présente thèse est la première à exploiter GR4J sous cette version orientée vers le bilan hydrologique et semi-distribuée par sous-bassin.

La figure.54 ci-dessus illustre le schéma général de la version semi-distribuée du modèle adoptée pour le cas du bassin de la Tafna.

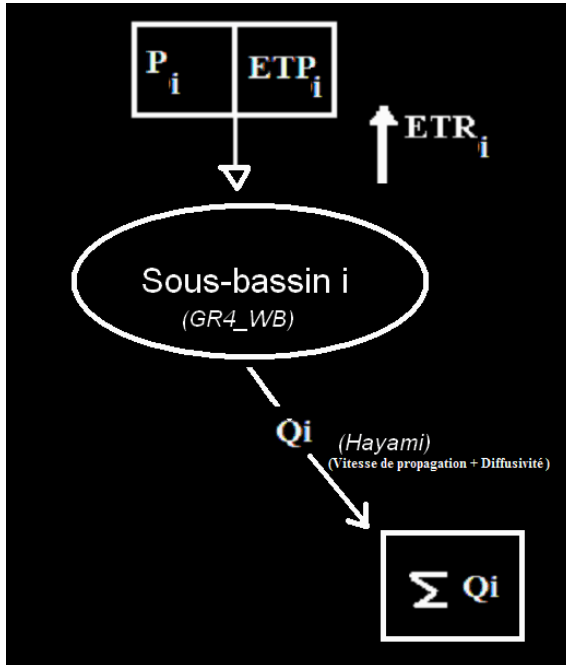


Figure. 54 Schéma adopté de GR4J_semi-distribué selon le principe d'HAYAMI

Selon ce schéma, en considérant les données d'entrées (P et E) et par application de GR4J sur chaque sous bassin, on notera Q_i la réponse sur chacun d'eux, c'est-à-dire les débits, sortant de chaque sous bassin. Ces contributions sont routées par l'intervention des deux paramètres d'HAYAMI celui de la vitesse de propagation de l'écoulement puis selon la diffusivité qui représente la façon dont il va s'étaler le long de son parcours entre le sous-bassin générateur et l'exutoire d'intérêt. Là, les contributions des sous-bassins d'amont sont additionnées en un débit résultant Q .

Puisque GR4J est appliqué au niveau de chaque sous bassin, le modèle est distribué par sous bassin. Il a été retenu 51 sous bassins sur la Tafna, nombre jugé suffisant pour rendre compte de la variabilité spatiale des entrées. Par ailleurs, nous avons pris comme amonts les bassins pour lesquels nous disposons de mesures (de débits) pour ne pas alourdir les calculs.

3-1 Application de GR4j_semi-distribué par sous bassins

Dans cette section, nous présentons la première application de l'approche semi-distribuée sur le bassin de la Tafna.

a- Mise en œuvre du modèle

Le bassin de la Tafna est subdivisé pour le calcul de la production par GR4j en plusieurs sous bassins, 51 au total. Ceci permet à la fois de valoriser la distribution des données d'entrée, puisque nous avons pu identifier un comportement différencié dans le bassin de la Tafna en fonction au moins de la lithologie et de l'emplacement (partie haute, partie basse). Cette discrétisation permet aussi de décrire le contenu des sous bassins pour lesquels nous disposons de données de débit, soit les 5 stations de Khemis, Béni-Bahdel, Mouileh Frontière, Zenata et Sikakk. Nous avons pris comme bassin intermédiaire celui de Mouilah « avant barrage » dans les simulations. Les chroniques journalières couvrent la période de [1975-2006] pour les précipitations et les débits. On ne dispose malheureusement que d'une seule chronique de température, couvrant la même période que nous avons recueillie auprès de l'ANRH. Cette chronique de température, mensuelle, est celle de Maghnia-Frontière. Cette chronique de température a été régionalisée (moyennant un gradient adiabatique de $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ proposé pour les pays semi-arides) à l'ensemble du bassin, et de là sur chaque sous bassin a été estimée l'ETP, initialement par la méthode de Thornthwaite. Les précipitations moyennes ont été évaluées par la méthode de Thiessen. Toutes les opérations pour la préparation des données et la mise en œuvre du modèle vont être discutées en détail dans cette section.

b- Mise en œuvre du calage et de la validation du modèle

Cette étape de calage/validation est impérative. A ce niveau, la méthode de calage/contrôle va nous aider à analyser et à discuter *le pouvoir* du modèle à *reproduire le fonctionnement* du bassin. Pour ce faire, nous avons optimisé les paramètres du modèle en fonction de nos données d'entrée (pluie, ETP) et de sortie (les débits). le calage porte sur les quatre paramètres (X1, X2, X3 ,X4) en gardant comme constante les deux paramètres du routage Célérité (C) et Diffusivité (D).

Nous avons recherché le jeu de paramètres qui nous permet de restituer des débits simulés proche des débits, la procédure du calage qui a été adoptée est la suivante :

Une première estimation des paramètres est d'abord réalisée sur chacun des bassins jaugés. On retient le bassin donnant le meilleur calage et on décide de retenir, pour l'ensemble du domaine simulé, la valeur des paramètres de routage de la fonction d'Hayami. La célérité (C) : 1.8 m/s et la diffusivité (D) : $0.8 (\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$

Ensuite, on a réalisé une optimisation, indépendamment pour chaque bassin jaugé, des 4 paramètres de GR4, considérés comme identiques sur chaque sous-bassin inclus dans ce bassin jaugé. L'intérêt de cette étape est primordiale, on est amené ici à rechercher la période pendant laquelle le bassin est le mieux décrit, donc le modèle le plus fonctionnel.

Les périodes de validation et de contrôle ont été choisies en majeure partie dans les données que nous avons pu collecter sur la période [1976-2006].

Une recommandation classique est de travailler sur des années où alternent des périodes humides et sèches pour balayer un maximum de conditions hydro-climatiques dans le modèle et donc s'assurer quelque peu de sa stabilité.

Il faut rappeler que l'application de GR4j est une première dans le bassin de la Tafna. Nous n'avons donc pas de recul sur l'utilisation de ce genre d'outils dans ce contexte. Ceci, nous a poussés à faire tourner le modèle en adoptant plusieurs hypothèses selon les conditions du bassin

Dans les phases initiales, différentes variantes ont été considérées relativement aux opérations de calage et validation. Elles sont expliquées et résumées ci-dessous :

1- Nous avons procédé, en premier lieu, comme il est toujours suggéré (quand on utilise les modèles pluie-débit) d'appliquer la méthode du split sample test (Perrin, 2000). Dans cette approche on effectue des opérations de calage et validation d'une manière croisée sur des périodes d'observations distinctes. Concrètement on distingue dans la période étudiée deux sous périodes distinctes, une première de calage et la deuxième en validation, puis on permute les périodes. Dans cette première phase, nous avons considéré que le paramètre X2, permettant des pertes ou des gains d'eau dans le bassin était nul, c'est-à-dire qu'on n'a pas autorisé ces pertes ou gains dans notre évaluation du bilan.

Cette première étape a été effectuée sur les sous bassins. On s'attend classiquement à ce que les critères d'adéquation (critère de Nash-Sutcliffe par exemple) soient meilleurs en calage qu'en validation. Ici nous avons constaté que dans tous les cas les critères étaient meilleurs pour la période 1976-1986, que celle-ci soit en calage ou en validation quant à la période 1986_1986 nous n'avons pas obtenu de Nash comme ceux de la première étape compte tenu de la qualité des données.

2-En deuxième lieu, nous avons effectué le calage et la validation selon différentes variantes pour une période de calage allant de [1976-1986] et de validation [1996-2006] en recourant aux variantes suivantes. En interdisant toujours, sauf mention contraire explicite, les pertes ou gain via le paramètre X2 mis à zéro

-optimisation libre, y compris transfert/transfert Global

On procède de la même manière que précédemment, mais on s'autorise à optimiser les paramètres de transfert en donnant une grandeur par défaut (autrement dit, on suppose qu'il y a un transfert d'une certaine valeur qu'on intègre dans les simulations).

-avec échanges souterrains

Dans cette opération, on autorise la possibilité d'échanges via une valeur non nulle du paramètre X2. Dans ce cas, le paramètre X2 n'est plus nul et il est lui aussi optimisé.

-optimisation conjointe, transfert global :

On tente par cette procédure de mettre en évidence, la perte ou le gain par rapport à la version station par station.

-Prise en compte de la fonte nivale dans l'optimisation

La couverture nivale sur les hauts de la Tafna, sans qu'elle soit forcément importante hydrologiquement peut être considérée comme utile pour le calcul du bilan. Mettant GR4 en condition de représenter qualitativement un peu de neige sur les hauts bassins, nous a aidé à corriger l'ETP.

Notre but dans ces tentatives était de rechercher pour quelle variante, et moyennant quelles conditions, on obtenait des critères admissibles pour le critère de Nash. Le choix des variantes a été effectué d'une manière indépendante. A chaque opération, la prise en compte de la condition considérée est mise en avant suivie d'une vérification des Nash obtenus.

Nous remarquons que les plus fortes valeurs de Nash sont celles des bassins de Khemis, Béni-bahdel et Sikkak, il faut rappeler que ces bassins sont à 60% formés par des unités très karstifiées. Il semble que le phénomène du karst influe positivement sur le gain en valeurs de Nash. La prise en compte de la neige semble aussi influencer le résultat de l'efficacité, mais peut-être indirectement, par la meilleure spatialisation de l'ETP (Figure.55).

Dans ces tâtonnements, il est apparu que le paramètre X2 « échange avec le souterrain » était la caractéristique la plus influente sur les résultats obtenus.

X2 est un paramètre de GR4 très discuté entre les utilisateurs du modèle. Il paramétrise des échanges (entrées ou sorties) avec un extérieur non spécifié.

Dans le cadre de développement traditionnel de GR4, en région parisienne, l'introduction des échanges paramétrés par X2 semble parfaitement justifiée, car il a été effectivement constaté des infiltrations profondes de la nappe libre des bassins étudiées vers les nappes semi-captives plus profondes du bassin parisien, sans retour hydrologique à l'échelle temporelle et spatiale étudiée ; l'attitude des auteurs de GR4, centrés sur une relation pluie débit non interprétative, est aussi un argument en leur faveur .

Cette version de GR4J, nous avons voulu imposer la conservation de l'eau, il est apparu que X2 prenait des valeurs très fortes, difficilement réalistes. A l'analyse, il s'agissait surtout de compenser formellement par une infiltration et ou une sous-évaluation initiale de l'ETP. Celle-ci a été ensuite corrigée, et dès lors les coefficients X2 ajustés sont devenus en valeur absolue beaucoup plus faibles ; En perspectives : nous pensons qu'il sera possible de revenir sur ce point soit de justifier ce terme d'infiltration , soit in fine , de le supprimer , quand les prélèvements (exportations hors du bassin de la Tafna) auront été précisés, que la couverture pluviométrique aura pu être améliorée, et que l'éventuelle présence d'infiltration de nappes profondes réelles aura été intégrée.

En conclusion, si on considère la conservation de l'eau comme un principe fondamental à respecter par le modèle, qu'on veut l'imposer, et qu'au vu des données

le modèle propose des solutions extrêmes pour se débarrasser d'eau en excès, il est probable qu'il faille revenir sur les données de forçage utilisées ou sur la qualité des données de débits mesurés.

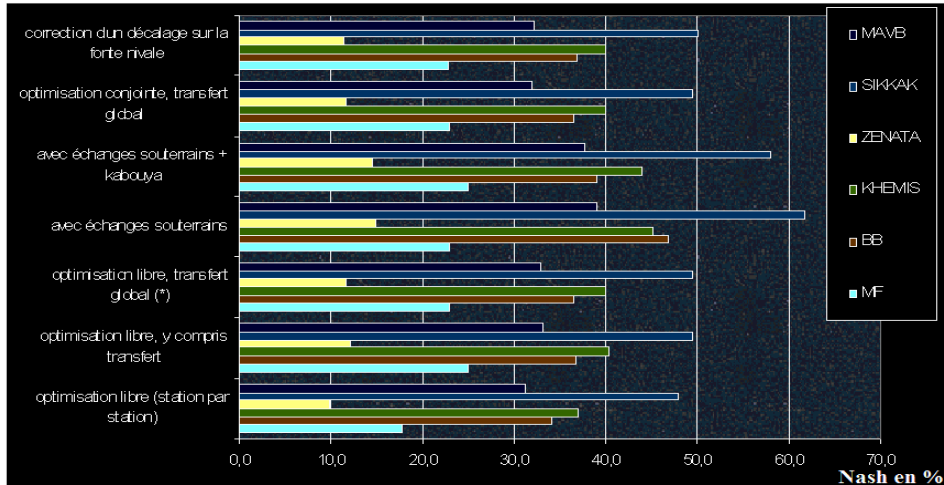


Figure. 55 Performance du modèle selon variantes adoptées pour les premiers contrôles / validations.

c- Valeurs des paramètres de GR4j semi-distribué

Nous avons examiné et comparé les valeurs des paramètres des quand même examiné pour chaque sous-bassin. Les valeurs des paramètres, ainsi que les critères de Nash sur les débits, les racines carrées du débit et le biais sur les débits sont présentés dans le tableau. 9

PARAMETRES	KHEMIS	BENI-BAHDEL	SIKKAK	BASSIN AVANT BARRAGE	Maghnia-Frontière
X1 (capacité maximale du réservoir du sol)	399	554	877	56	58
X3 (Capacité du réservoir de routage)	4,7	1,3	8,22	1,16	1,39
X4 (temps de base de l'UH)	0,00053	0,00078	0,00059	0,00054	0,00096

Tableau. n° 9 récapitulatif des paramètres de GR4j_semi-distribué

Les paramètres calculés sont ceux caractérisant la capacité du réservoir de production X1, la capacité du réservoir du routage X3 et le temps de base de l'hydrogramme unitaire X4. Dans cette section nous allons nous contenter seulement

de présenter que les variations spatiales les plus pertinentes des paramètres sur chaque sous bassins: ce qui le cas pour X1 et X3.

La figure.56, ci-dessous, représente la variation du paramètre X1 en calage pour les sous bassins étudiés, nous remarquons que la valeur oscille entre [56-877] mm.

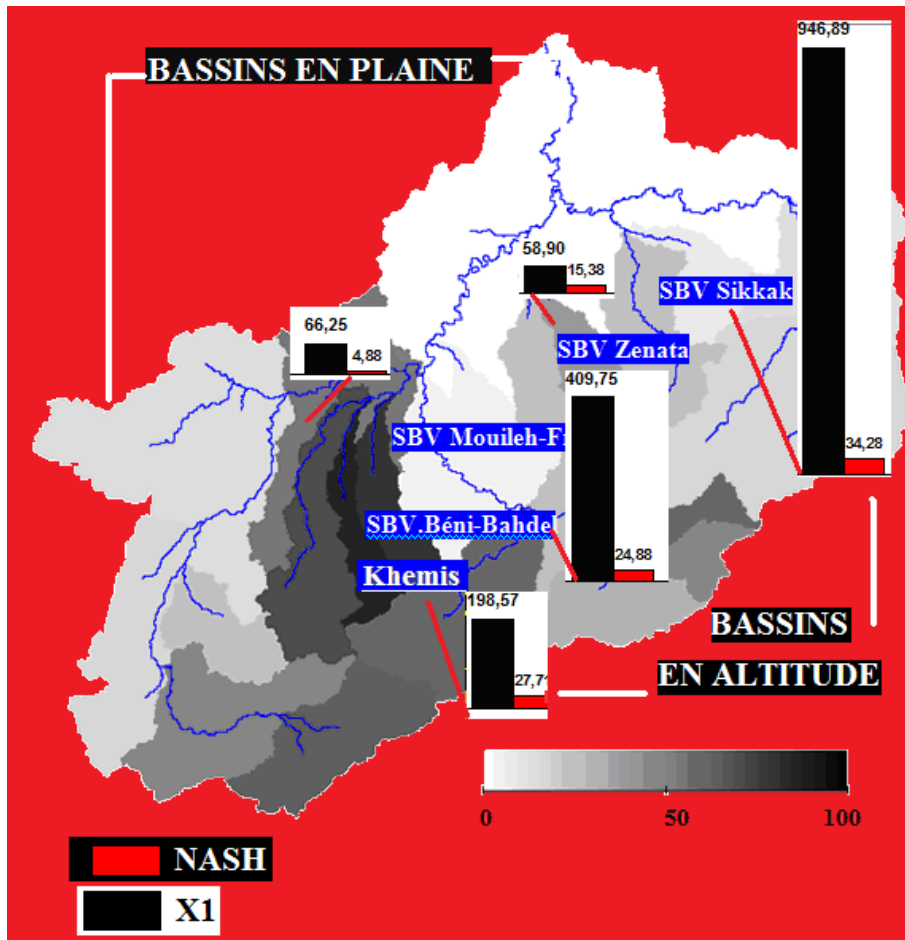


Figure.56 Illustration de la variation du paramètre X1

La capacité du réservoir la plus importante est obtenue au niveau du bassin de Sikkak et la plus faible au niveau du barrage de Mouileh (Tableau.9) . Nous remarquons aussi que le paramètre X1 est très proche pour les bassins de Khemis et Beni- Bahdel et un peu plus fort pour le bassin de Sikkak. Ces trois sous bassins ont eu le plus souvent des comportements très similaires du fait que le karst y est bien développé. Nous pouvons dire que le paramètre X1 présente une variation importante entre les bassins en plaine et les bassins en montagne. Ceci est à mettre en regard de la distinction que nous avons faite à l'issue de l'étude des tendances des écoulements au chapitre III.

Le paramètre X3 montre (figure 55), par contre, une similitude entre un bassin en montagne avec des formations très karstifiées qui est Béni-bahdel et un second en plaine avec un contexte géologique différent qui est celui de Zenata, ce qui explique que le modèle n'intègre pas l'aspect physique sinon, on aurait pu avoir une valeur importante pour le bassin de Béni-Bahdel puisqu'il dispose déjà d'une composante souterraine validée par la valeur du BFI discutée dans le chapitre III.

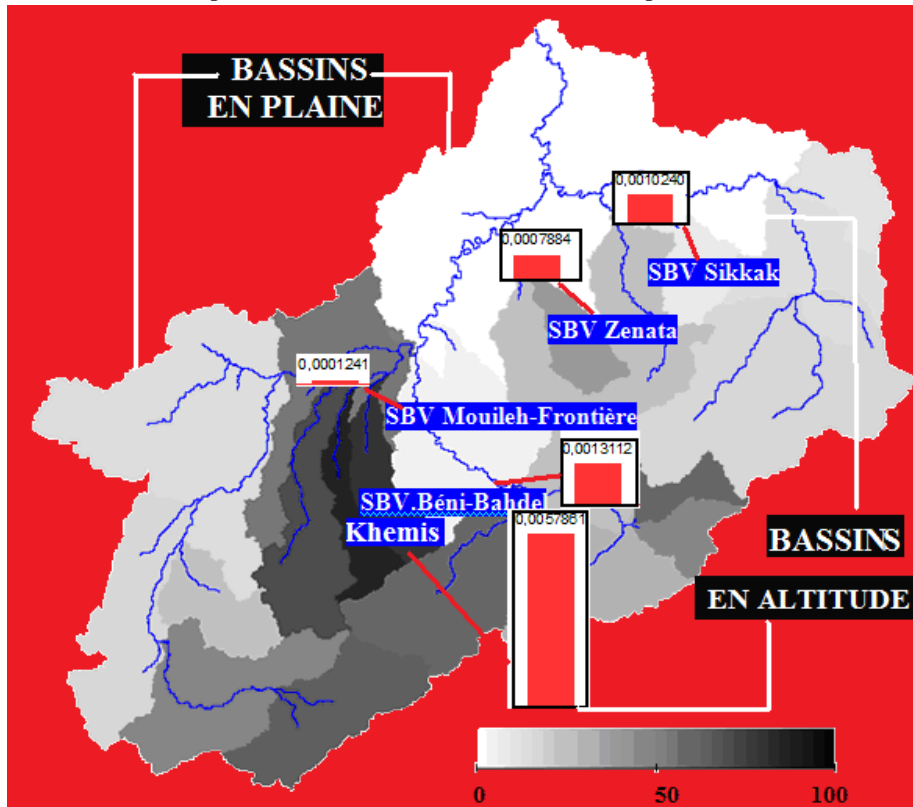


Figure. 57 Paramètre de transfert X_3 obtenus par GR4j_semi-distribué
3-2 Résultats des simulations par sous bassins

Nous présentons dans cette section les résultats des simulations issues du premier calage présenté précédemment pour les différents stations (des cinq bassins versants présentés dans le chapitre II) Il s'agit donc d'une première appréciation de l'efficacité du modèle proposé. Il s'agit ici de visualiser l'adéquation entre les débits observés (bleue) et simulés (rouge). On est loin à ce stade de trancher sur la robustesse du modèle, analyse que nous réservons au chapitre V.

1- Sous bassin de khemis

Nous avons procédé au tracé des différents hydrogrammes simulés, représentés en rouge et observés en bleu ainsi que le stockage au niveau du sous bassin sur la même figure au cours de la période 1986-1996.

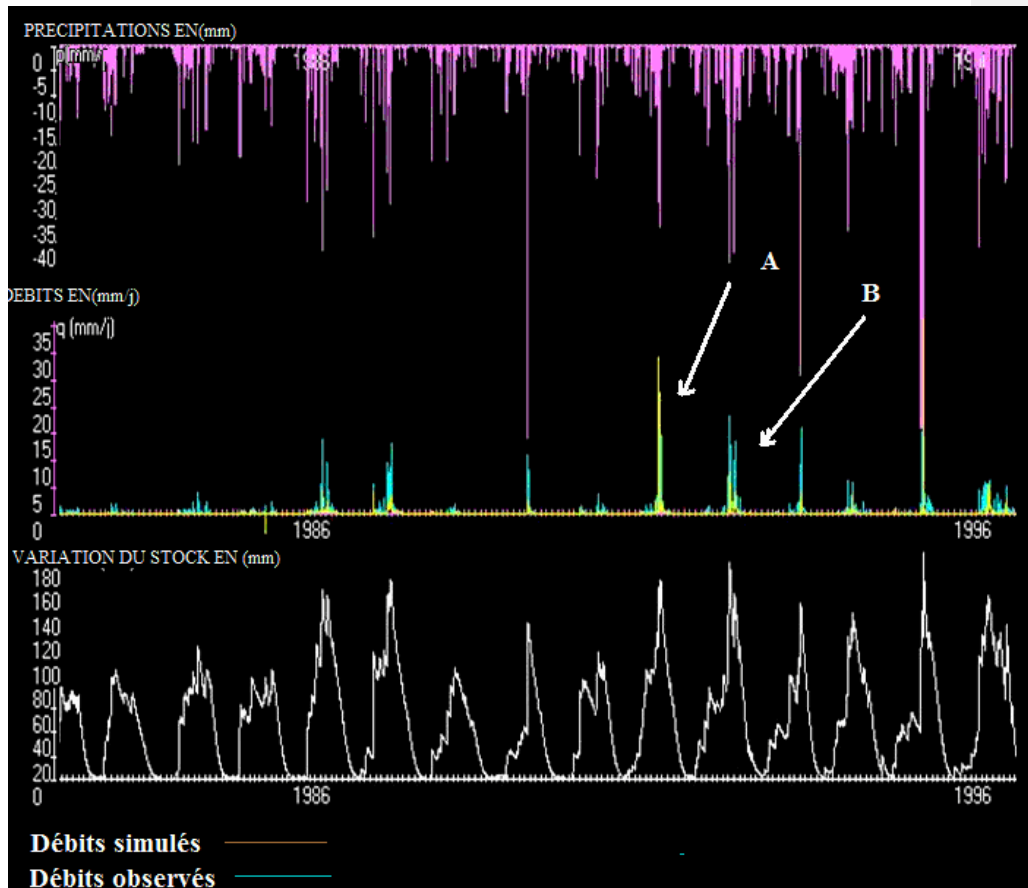


Figure. 58 Comparaison des débits journaliers observés (en rouge) et simulés (en bleu) (diagramme du haut). Evolution du stock du réservoir de stockage simulé (diagramme du bas). Sous-bassin de Khemis.

L'allure générale des courbes des débits journaliers simulés semble proche de celles des débits observés sur le bassin. En termes de stockage, le système semble traduire ce qui se passe en réalité en période de pluies, le bassin stocke puis déstocke à la fin de chaque évènement. La distinction se fait particulièrement au niveau des périodes de crue où le modèle enregistre une légère surestimation des débits maxima que nous avons évaluée à 15% de plus que le débit réel (Figure.59). Cette constatation n'est pas stable sur toute la période étudiée, il arrive parfois que certains débits

simulés soient très importants correspondant même à des crues, alors que sur les débits observés aucune crue n'a été notée.

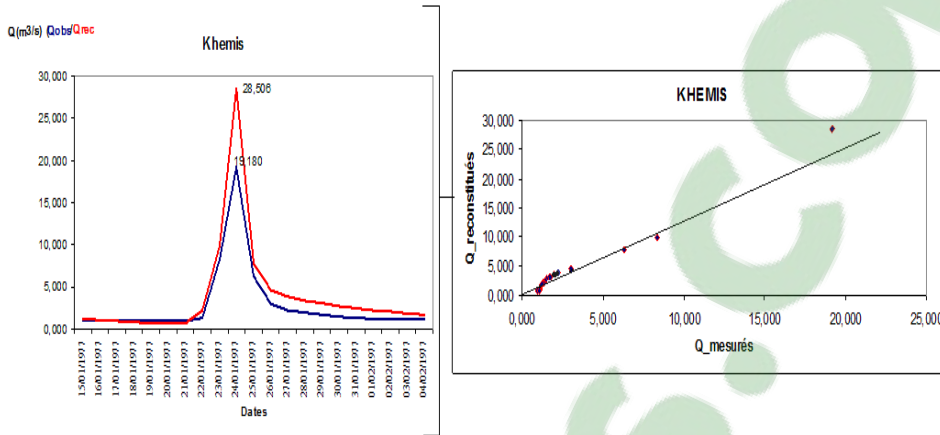


Figure59 Extrait de chronique débits/pluies du sous bassins de Khemis

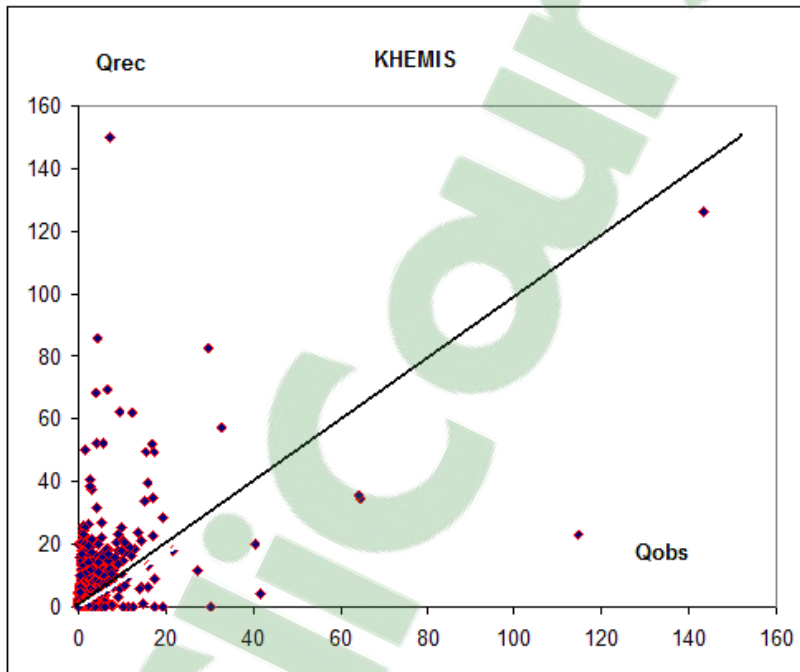


Figure. 60 Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Khemis.

Nous avons procédé à la représentation, entre autres, de la corrélation entre les débits reconstitués et les débits observés sur la période citée. Sur la figure.59, le

coefficient de corrélation(R^2) indique une valeur de 80% sur les simulations pour une plus grande corrélation atteinte alors que si on calcul cette dernière sur l'ensemble de la période étudiée [1976-2006], le coefficient R^2 donne 30% (figure.60).

2- sous bassin de Béni-Bahdel

L'allure des hydrogrammes simulés du sous- bassin de Béni-Bahdel suit en quelques sorte l'intensité des événements et son comportement se calque presque sur celui de Khemis. Ces deux sous bassins se trouvent dans la partie amont du bassin de la Tafna. L'étude des écoulements nous a révélé que ces deux unités ont un fonctionnement semblable et partagent le même contexte géologique. Figure.61

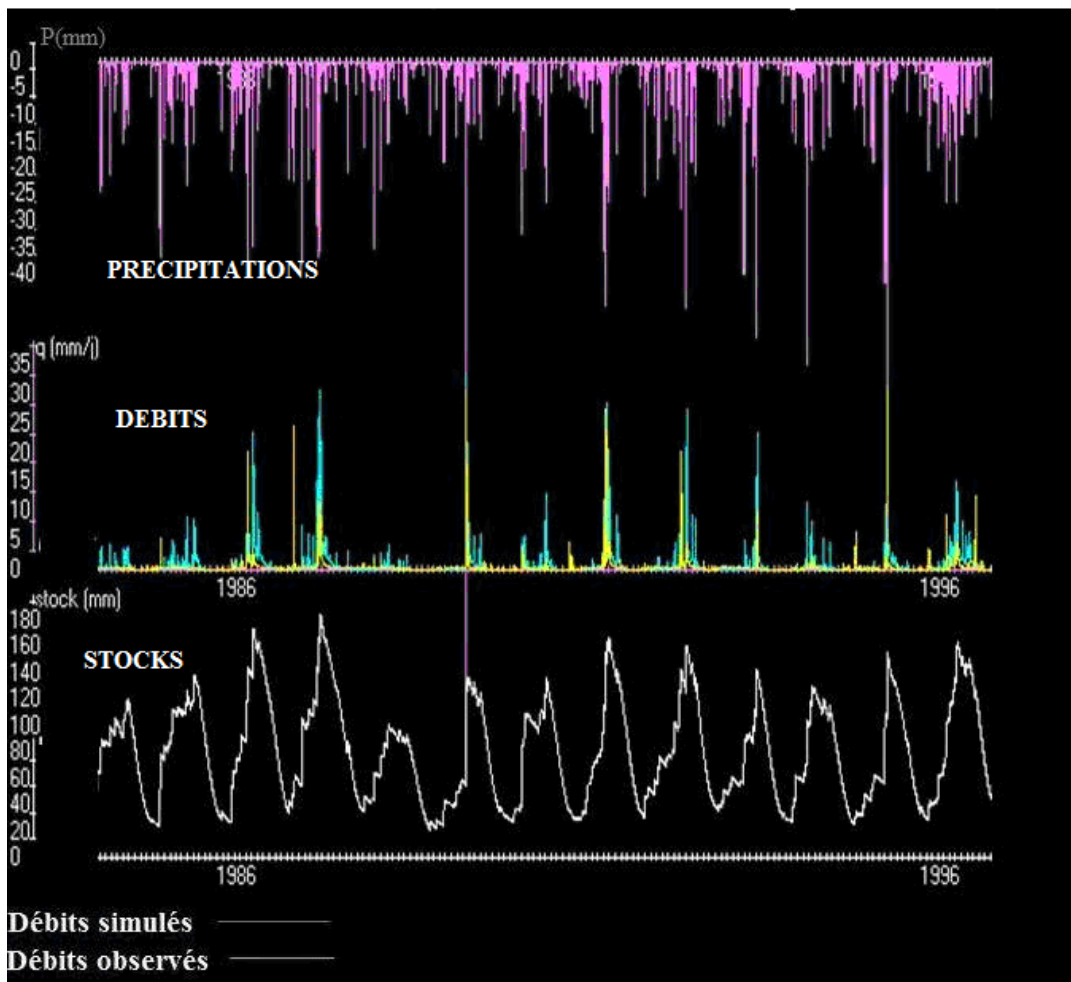


Figure. 61 Extrait de simulation (debits observes/debits simulés) sur le bassin de Béni-Bahdel

Le modèle arrive à simuler mieux les débits observés pour les périodes humides (Figure 62-63) et à un degré moindre les périodes d'étiage. L'hydrogramme simulé semble sous-estimer les débits réels pour l'évènement extrêmes pour la période que nous avons choisie [2001]. Cette situation n'est pas similaire si on recherche les corrélations sur toutes les chroniques qui donnent seulement un écart de 40% .

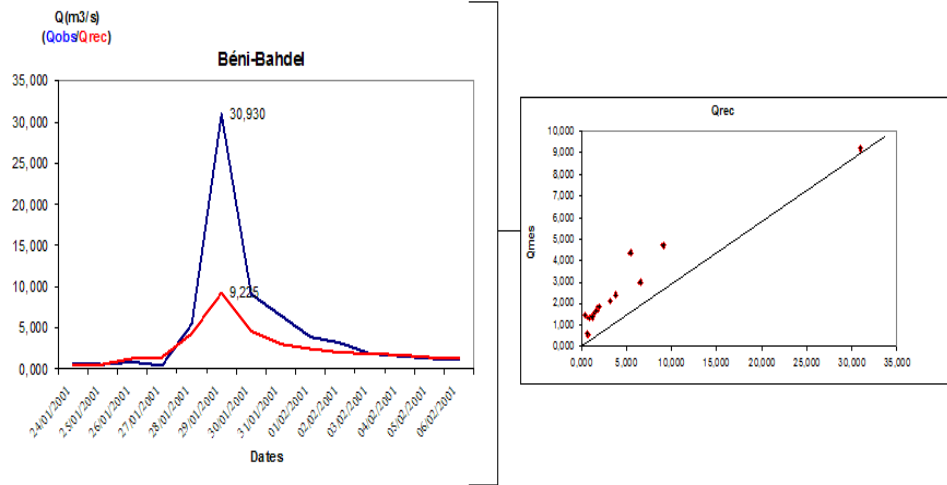


Figure.62 Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Béni-Bahdel sur la période 2001

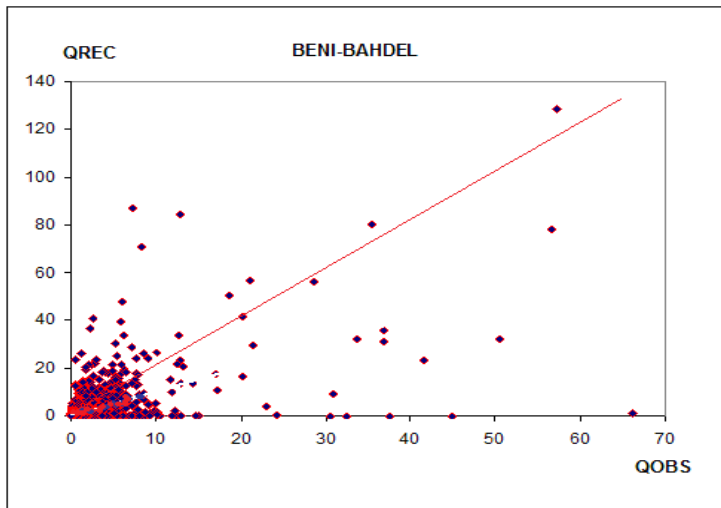


Figure.63 Comparaison entre débits observés et simulés du sous bassin de Béni-Bahdel

3- Sous bassin de Maghnia-Frontière

L'allure des hydrogrammes de simulations représente parfois les débits observés mais on remarque moins bien, le comportement des débits simulés en étiage sur cette échelle. Pour expliquer ces différences, on peut évoquer un impact sur les données lié aux différentes activités anthropiques abondantes dans la région. De plus, ce bassin couvre une superficie de 1819 km² et la plupart de ses eaux se dirigent d'abord vers le territoire marocain puis rejoignent le cours d'eau de la Tafna en Algérie (comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre II). Il est possible que les débits mesurés soient impactés par des activités dans le pays voisin (comme des prises d'eau ou rejet d'eaux usées dont on ignore aussi les quantités), (Figure 64)

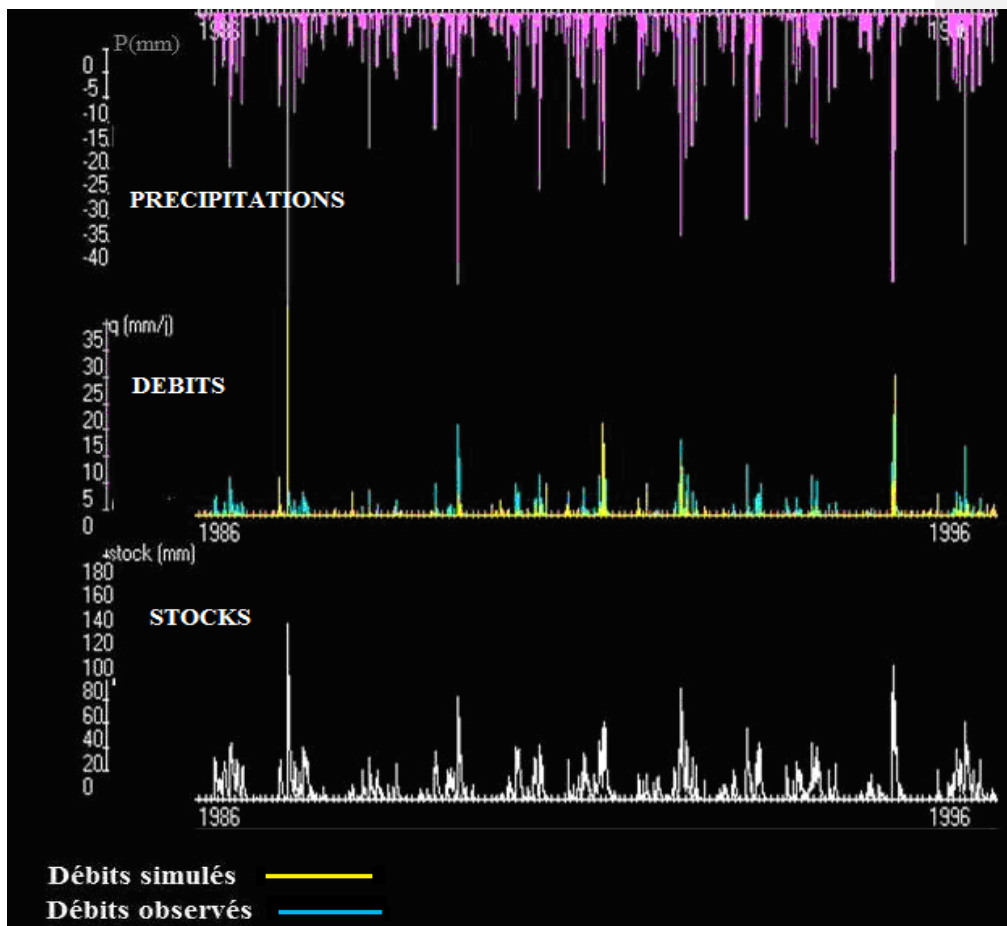


Figure.64 Extrait de simulation (débits observés/débits simulés) sur le bassin de Maghnia-Frontière

La simulation des débits en période de crue semble surestimer parfois les débits réels. L'écart observé entre les débits calculés et observés pour une courte durée (02jours)

est très important pouvant atteindre les 80% . Mais la corrélation sur l'ensemble des chroniques (1976-2006) donne de moins bons résultats avec un R^2 de 24% de la entre débits simulés et débits calculés. Les importantes corrélations retrouvées concernent uniquement quelques évènements (Figure65 et 66).

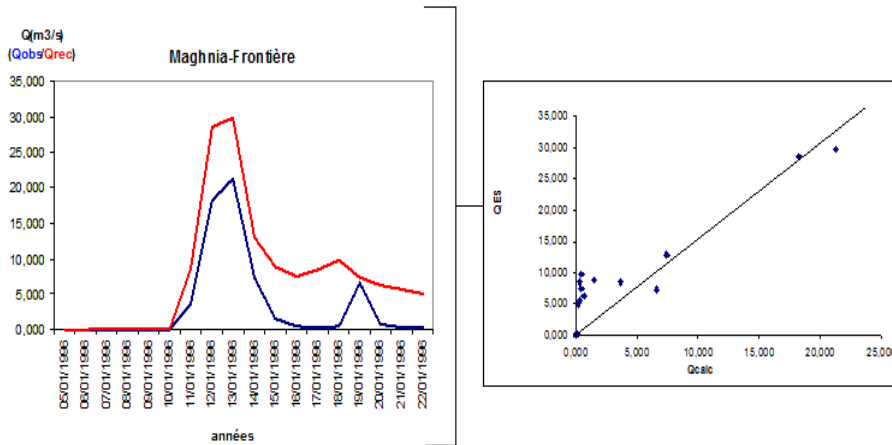


Figure.65 Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Maghnia-frontière sur la période 1979

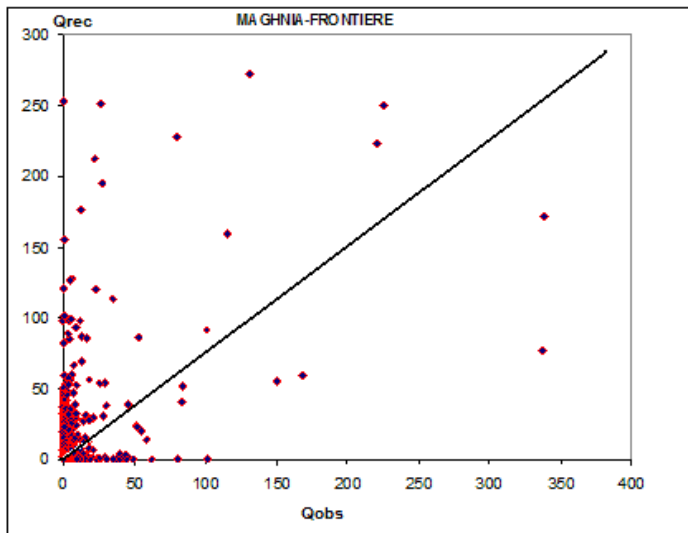


Figure.66 Droite de régression entre débits observés et simulés du sous bassin de Maghnia-frontière

4- Sous bassin de Sikkak

L'allure des courbes des débits observés / reconstitués reproduit bien les impulsions des pluies qui produisent les débits écoulés. Ce qui a retenu notre attention est le

stockage au niveau du bassin. Nous sommes allés sur le terrain afin de mieux comprendre ce qui se passe dans ce sous bassin. Il s'est avéré qu'une partie des eaux usées de la ville de Tlemcen se jettent depuis les années 90 dans le cours de l'oued Sikkak ce qui peut expliquer qu'il y ait tout le temps de l'eau stockée avec ou sans évènements.

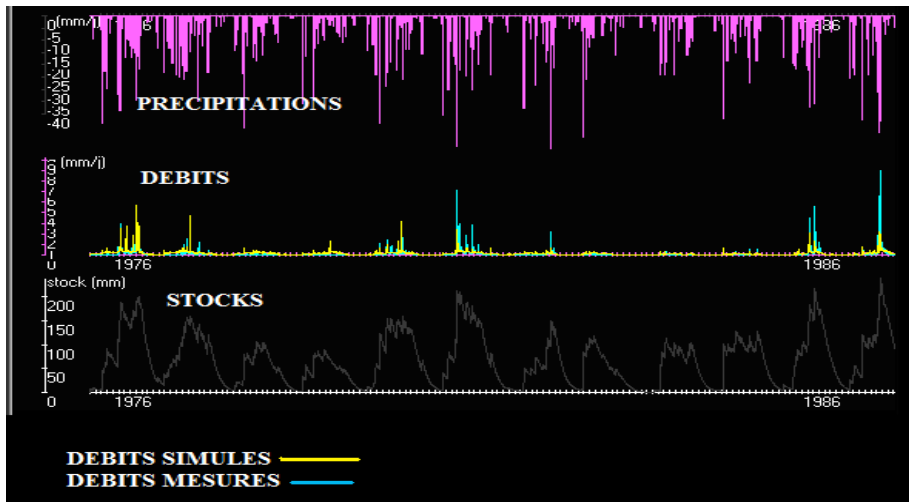


Figure. 67 Extrait de simulation (débits observés/débits simulés) sur le bassin de Sikkak .

La corrélation pour ce bassin défini aussi bien une similitude entre les débits reconstitués et mesurés mais uniquement pour certaines chroniques. L'écart conserve une valeur de 80% pour les évènements de court terme et sur l'ensemble de la période étudiée R^2 donne 60% ce qui paraît acceptable (le modèle se rapproche du comportement du bassin de Sikkak) sur la période 1980

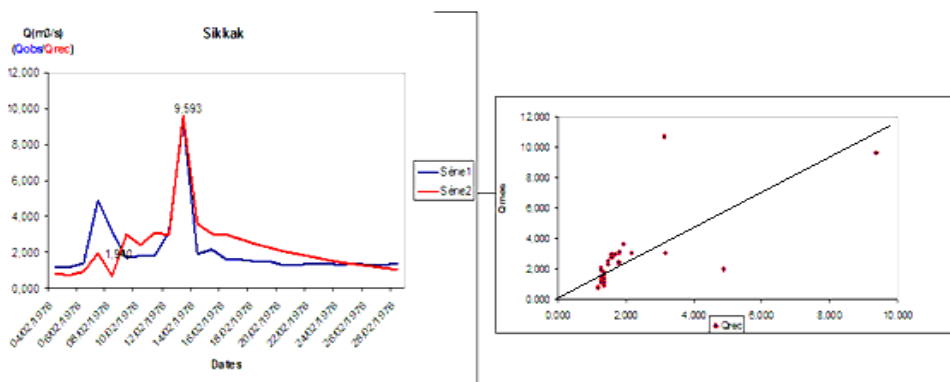


Figure. 68 Comparaison entre débits simulés et débits observés du bassin de Sikkak sur la période 1980

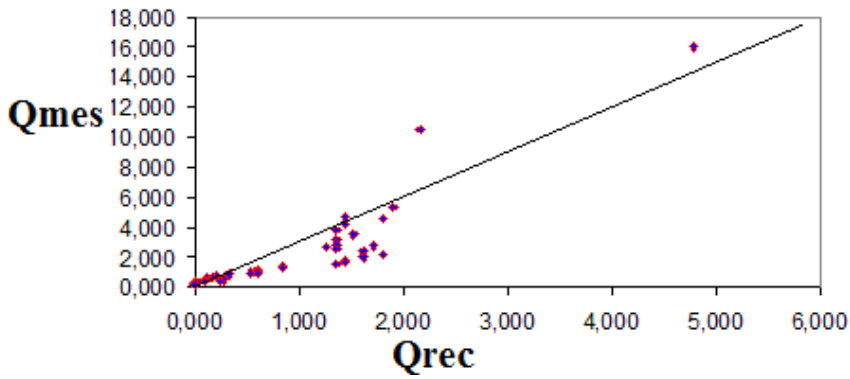


Figure.69 Droite de régression entre débits observés et simulés du sous bassin de Sikkak

Sur l'ensemble des chroniques, on perd un peu de la relation débits observés/ débits simulés avec une corrélation avoisinant les 65% Figure.68- 69.

5- Sous bassin de Zenata

Dans le sous bassin de Zenata, les hydrogrammes des simulations présentent des allures un peu différentes, Les débits simulés indiquent la présence de plusieurs épisodes de crues alors que sur les débits mesurés ces événements sont plus ou moins rares. (Figure. 70)

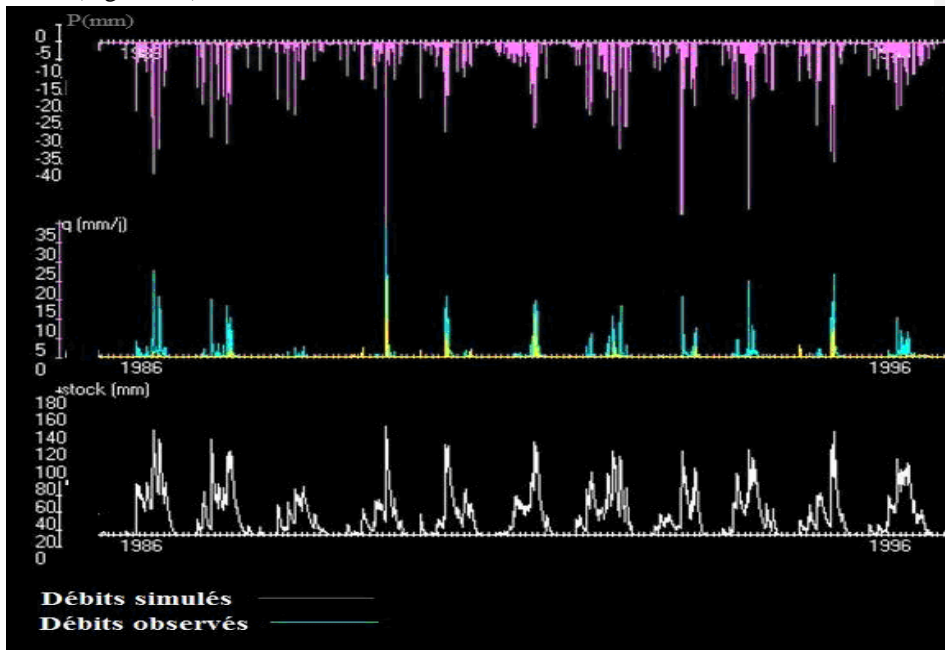


Figure. 70 Extrait de simulation (débits observés/débits simulés) sur le bassin de Zenata

Nous avons essayé de rechercher les bonnes similitudes entre les chroniques mesurés/calculés mais les évènements étaient assez loin de satisfaire notre objectif. La seule chronique qui semblait la plus correcte est celle de la période [1986] représentée, ci-dessous.

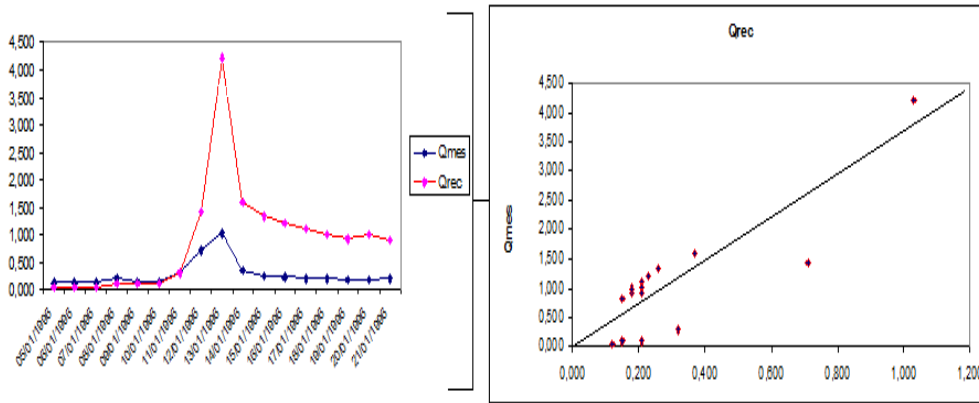


Figure. 71 Comparaison entre débits simulés et observés sur le bassin de Zenata pour la période [1996]

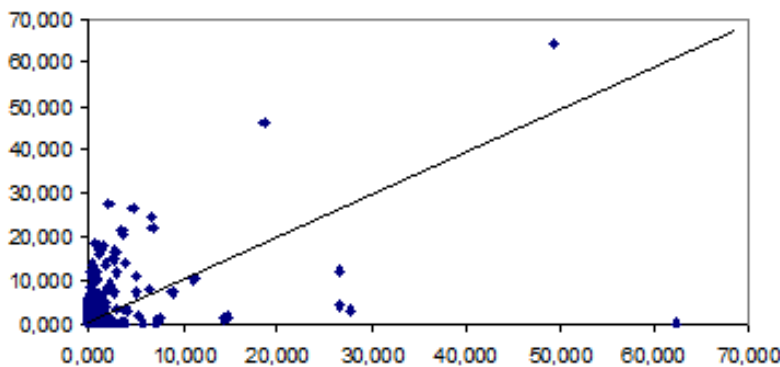


Figure.72 Corrélation entre débits observés et simulés du sous bassin de Zenata.

3-3 Conclusion partielle

Les comparaisons visuelles et quantitatives sur l'ensemble des chroniques (observées/simulées) que nous avons présentées à travers les sous bassins de la Tafna sont relativement acceptables compte tenu de son extrême hétérogénéité. Les écarts sont importants pour certains évènements de courts termes sur quelques bassins (Zenata, Sikakk) avec des tendances à la surestimation des débits extrême (Khemis, Béni-bahdel,) sans doute induits à la non fiabilité des données évoqué dans

le chapitre III. Pour ce qui est du bassin de Zenata, on observe des anomalies particulièrement flagrantes corroborées par un comportement qui suggère qu'il est le siège de plusieurs manipulations qui restent à identifier.

Les simulations que nous venons de discuter sont le résultat de l'étape de calage/validation. Cette opération a été effectuée tour à tour sur chacune des périodes pour lesquelles des données étaient disponibles. La qualification de l'efficacité des simulations a été obtenue par le calcul de l'efficacité de Nash (cf.chapitreII).

4- Vers une amélioration du calage et de la validation avec la prise en compte du biais dans les Nash

Cette section a été proposée à la suite des deux étapes précédentes et des différentes constatations que nous avons faites et que nous avons vu inutile de présenter les résultats des différents essais vu leurs nombre. Nous avons remarqué que la plupart des Nash obtenus (figure 73), sont assez peu satisfaisants en eux-mêmes, s'accompagnaient d'erreurs de bilan importantes durant nos essais (biais lié au rapport entre la lame d'eau simulée et la lame d'eau observée).

En pratique, on recherche plutôt de bons Nash, mais le biais doit rester réduit. La solution était d'intégrer les biais dans le critère d'évaluation utilisé pour le calage. On se retrouve à ce niveau avec une fonction objective composite, écrite sous la forme suivante ;

$$\text{Critère de qualité} = a*(\text{biais})^2 + b*(1 - (\text{Nash})^2) , \text{ à minimiser.}$$

Les biais et coefficients de Nash-Sutcliffe étant exprimés en pourcentage, on a choisi $a=1$ et $b=9$, considérant qu'un biais de 300% ou un Nash de 0 % avaient le même effet pratique de disqualifier la simulation réalisée.

Une fois la mise en place de la formule dans le code source, nous avons relancé notre recherche pour identifier les intervalles de performance de GR4j_semi-distribué en fonction de la période étudiée.

Ainsi nous avons amélioré la technique de calage et validation, d'après les observations faites sur nos tests de simulation qui étaient souvent bons pour les calages et mauvais pour les validations (biais important), en adoptant un critère bien plus pertinent.

Nous avons constaté que les bilans ne pouvaient pas s'améliorer sans reprendre l'estimation de l'ETP. Cette estimation corrigée, les Nash sont restés bons et les bilans sont devenus raisonnables, avec des valeurs de X2 beaucoup plus faibles qu'antérieurement, ce qui nous semble un progrès pour les raisons discutées plus haut.

Il est ensuite apparu que le calage en split-sample ne donnait pas de résultats très probants, la valeur des critères sur la période récente étant plus faibles que cette période récente soit utilisée en calage ou en validation.

Nous avons donc modifié notre technique de calage / validation pour adopter une approche plus pratique, que nous proposons ici.

Le procédé est simple, nous avons pris pour la période de calage toute la période étudiée [1976-2006] puis nous avons validé non pas sur chaque dix ans comme il est souvent recommandé (Perrin, 2000) mais sur chaque sous périodes de cinq ans prises période par période sur toute la chronique. Le principe de base est illustré sur la figure.73, ci-dessous,

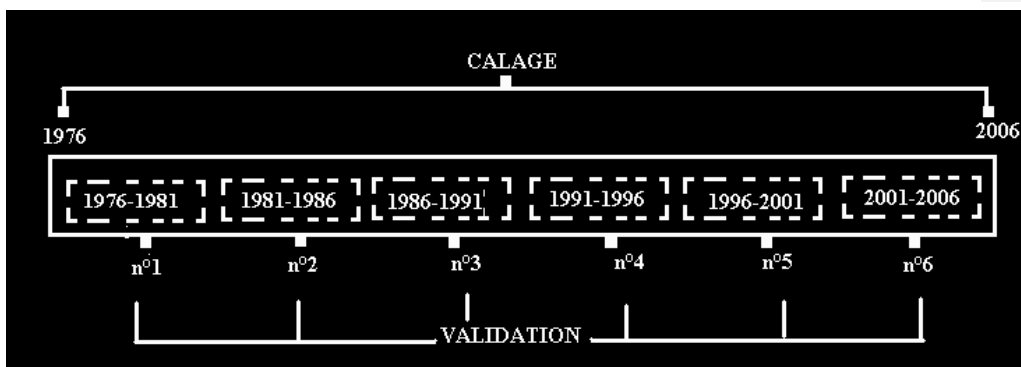


Figure.73 Technique de Calage/Validation proposées

L'application de la technique, nous a conduits à des résultats inattendus. Les Nash retrouvés sont meilleurs pour les validations des années anciennes alors que l'efficience est très mauvaise pour les années récentes.

Par ailleurs, il y a une période commune aux différents sous bassins où le Nash n'est pas significatif, cette période est celle de [1991-2001] et à un degré moindre celle de [2001-2006], (Figure.74). Il se trouve que pendant cette période le modèle n'arrive plus à reproduire ce qui se passe au niveau du bassin de la Tafna en termes de relation entre les pluies et les débits mesurés ou écoulés. Il est intéressant de rechercher les causes d'un tel comportement.

Dans le chapitre III, nous avons mis en évidence des tendances à la baisse et des années de rupture pour les débits durant la décennie 1990-2000, ce qui pourrait expliquer les résultats trouvés. Nous n'avons pas détecté de tendance à la baisse des précipitations sur la période [1975-2006], alors que Meddi et al.(2010) signalent une rupture sur les pluies annuelles à partir des années 1970 ce qui veut dire que notre période d'étude (1975) s'insère bien dans la période de rupture qui débute depuis 1970. On ne sait pas à ce stade si cette tendance serait la seule cause de la perturbation notée uniquement pour la période (1996-2001). La seule explication est que le bassin aurait été le siège soit d'une ou plusieurs manipulations dont on ignore les causes et qu'il faut rechercher. On peut aussi suspecter une maintenance et un suivi des

appareils de mesure plus erratique sur cette période difficile pour l'Algérie. Les validations restent à priori meilleures pour les années anciennes.

Cette approche nous semble originale, nous n'avons pas retrouvé d'équivalent dans la littérature. La raison essentielle est probablement qu'elle fait apparaître le calage comme une technique de critique de données, ce qui n'est plus habituellement la préoccupation usuelle à ce stade.



Figure.74 Période commune de faible validation relevée sur les sous bassins étudiés

4-1 Bilan hydrologique par la version GR4j semi-distribuée

Nous présentons, une première estimation des différentes composantes du bilan hydrologique du bassin de la Tafna telle qu'elle est restituée par GR4j semi distribuée au niveaux des unités de Khemis, Béni-bahdel, Sikkak, Mouileh frontière et Zenata.

Ce bilan est évalué sous la condition que le bassin de la Tafna soit assimilable à un système fermé pour vérifier l'égalité:

$$P = Q + E \pm \Delta S$$

P: Pluie en mm

E: Evapotranspiration en mm

Q: Débits écoulé en m³/s

Ces différents termes sont exprimés sur un cycle hydrologique. L'estimation des différents termes ont été évaluées comme suit:

a)-Les précipitations

Les précipitations ont été exprimées en termes, de lame d'eau spatialisée par la méthode de Thiessen et de krigeage pour rendre compte du biais issu de la faible a densité de stations de mesure. Cette technique a été particulièrement instructive dans le cas du sous bassin de Zenata qui présentait des anomalies.

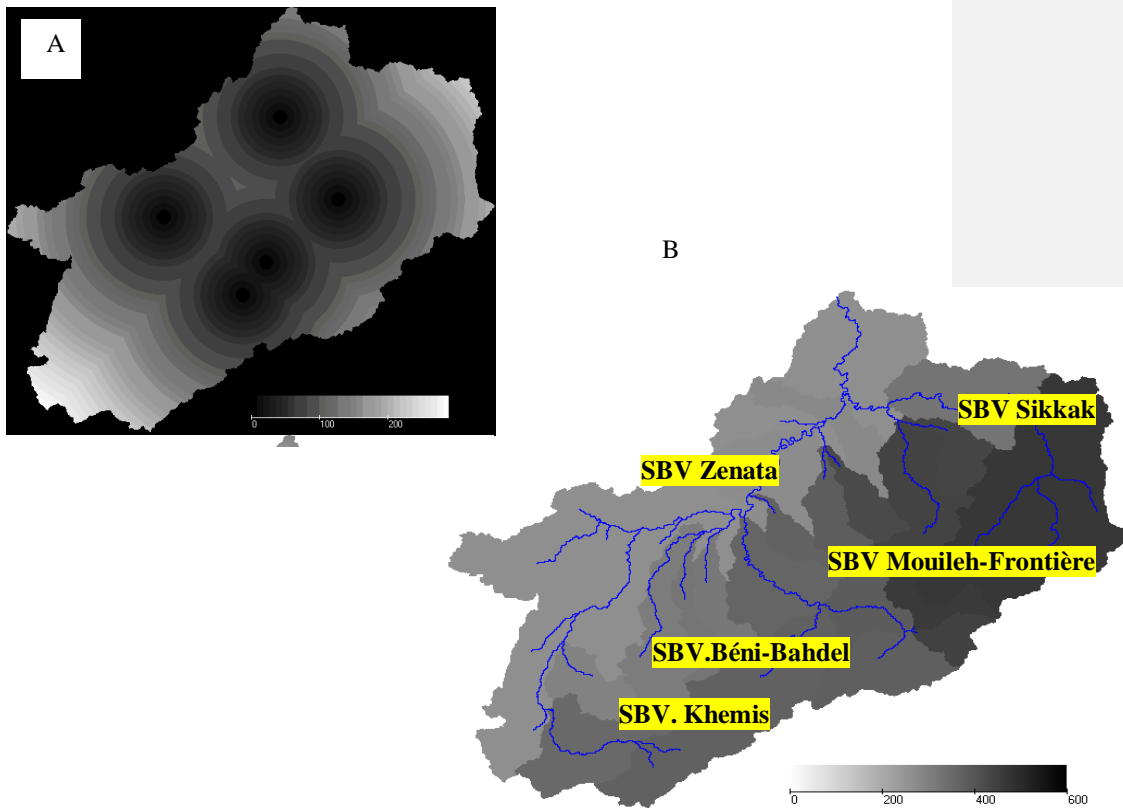


Figure.75 Carte des précipitations annuelles en mm
Estimée (Thiessen en A et GR4jen B)

b)-L'évapotranspiration réelle

C'est le terme du bilan le plus délicat particulièrement, lorsqu'on a un nombre réduit de stations. Selon Dérive (2003) est une donnée déterminante pour établir le bilan hydrologique. Elle peut représenter 50% à 90% du bilan.

Pour le cas d'étude, la valeur de l'ETR (exposé préalable du calcul de l'ETR) a été déduite des données de température et de l'ETP. Elle est estimée à 297 mm (Tableau,10). Il en ressort que les sous bassins en montagne rassemblent des taux plus élevés de l'ETR que ceux en plaine ce qui est inhabituelle.

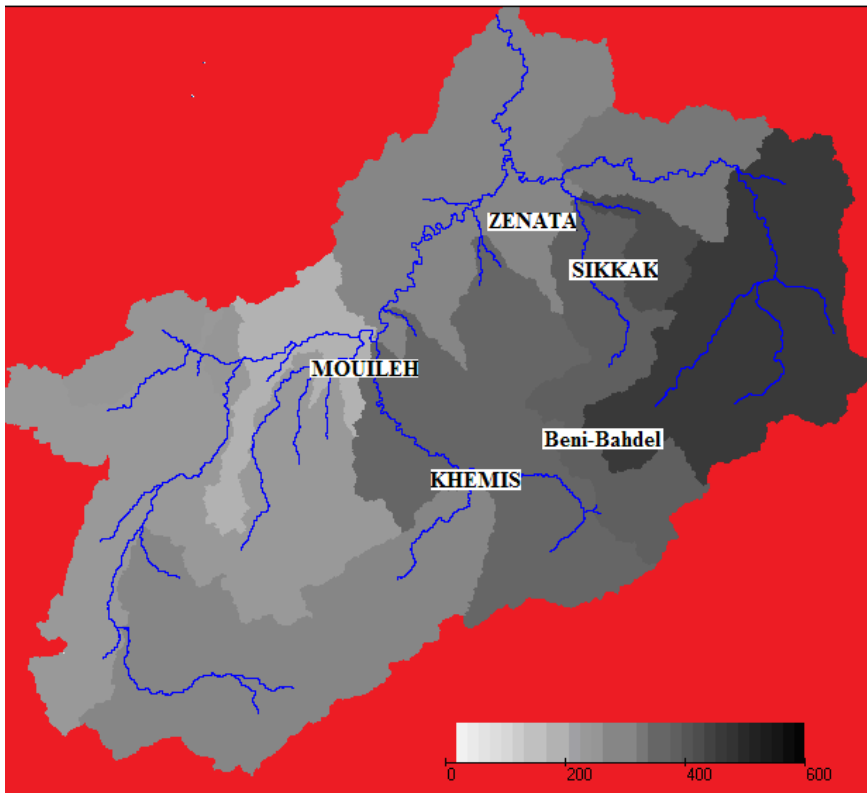


Figure76 Carte de l'ETR (mm) issue du bilan GR4

c)-L'écoulement

L'écoulement dans le bassin de la Tafna est influencé par deux facteurs, l'irrégularité des précipitations et les affleurements karstiques qui donnent aux sous bassins l'aptitude de maintenir l'écoulement même en période d'étiage. Dans la Figure.77, on observe la distinction entre les sous bassins en termes de répartition de l'écoulement telle qu'elle est obtenue via le MNT.

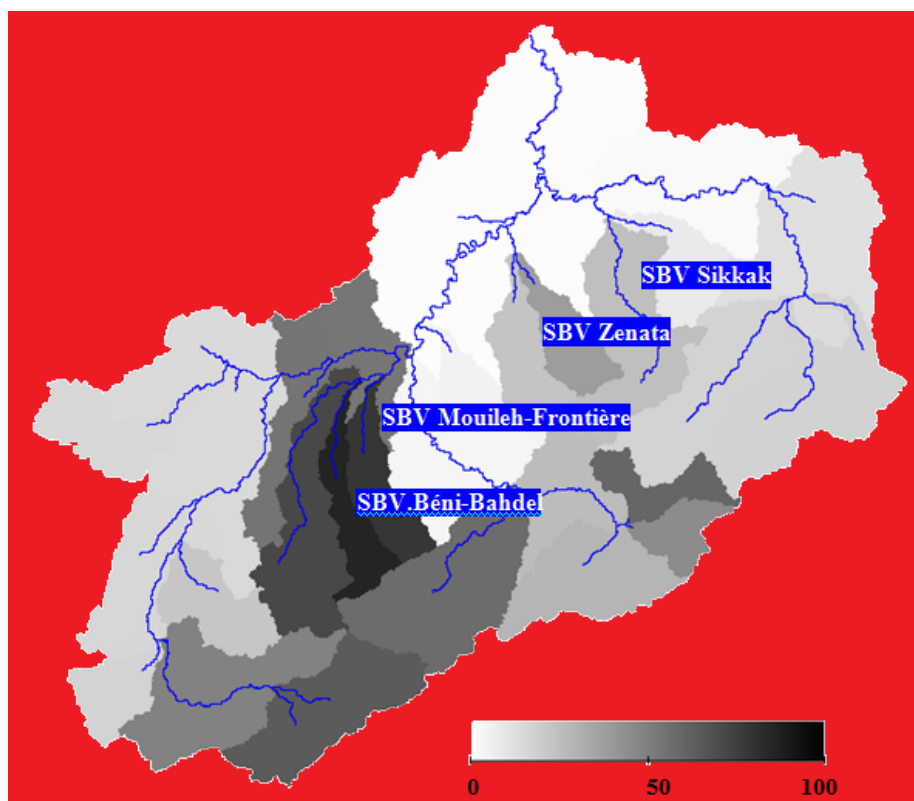


Figure.77 Carte de l'écoulement issue du Bilan GR4

L'écoulement a été estimé par le bilan à 40mm/an. On pourrait rappeler à ce niveau que les bassins les plus productifs du bassin étudié sont ceux situés en montagne autrement dit les plus affectés par la karstification (Bakreti et al. 2012).

5- Bilan annuel Tafna

L'ensemble des termes du bilan estimés à l'échelle annuel par GR4j semi-distribué sont récapitulés dans le tableau. 10 et les figure 78-79 reproduisent la variation mensuelle et interannuelle des différents termes.

Bassin de la Tafna (à Rechgoune) Superficie 7278,5 km ² .						
Mois	Précipitations <i>ptot</i>	ETP <i>e</i>	ETR <i>etr</i>	Écoulement <i>q</i>	Bilan <i>wb</i>	Variation du stock <i>ds</i>
1	45,91	59,79	30,18	6,14	36,01	7,71
2	44,89	60,74	32,87	6,8	38,88	2,88
3	50,09	77,99	40,66	10,97	34,91	-3,97
4	36,4	83,14	38,78	4,3	26,96	-7,95
5	34,4	103,39	38,92	3,56	17,74	-9,21
6	7,54	124,32	18,12	0,62	6,35	-11,4
7	2,45	148,14	6,91	0,1	1,73	-4,62
8	4,08	149,84	4,25	0,02	1,5	-0,23
9	13,71	126,62	11,1	0,08	3,97	2,48
10	26,23	105,89	20,43	0,59	8,95	4,98
11	45,86	77,39	26,45	3,36	24,05	15,09
12	37,95	65,49	29,01	3,56	28,3	4,25
année	349,5	1182,74	297,69	40,1	229,36	0,01

Tableau.10 Moyennes mensuelles et annuelles interannuelle des termes du bilan hydrologique selon GR4j_semi-distribué

Selon les résultats obtenus, nous pouvons constater que le bilan est bouclé. Il est du type :

$$P = ETR + Q \pm \Delta S$$

Nous pouvons tout de même prendre en compte l'incertitude de ses termes qui seront repris en détail dans la section sensibilité.

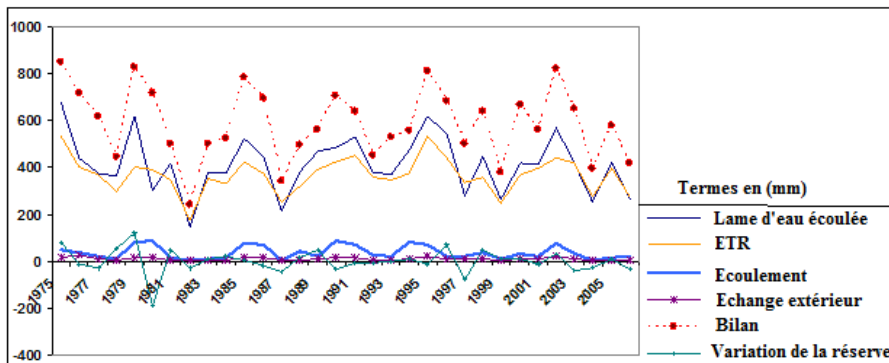
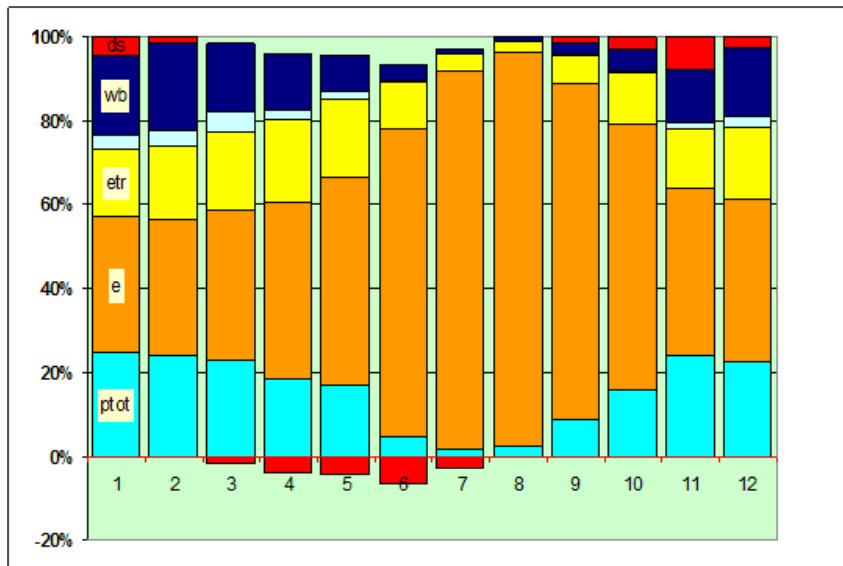


Figure.78 Variation interannuelle du bilan



ds : Variation de la réserve
 wb: Bilan
 etr: Evapotranspiration réelle
 e: Evapotranspiration potentielle
 ptot: pluies

Figure.79 Variation mensuelle interannuelle des paramètres du bilan

La figure, ci-dessus, illustre la variation interannuelle des différents termes à l'échelle mensuelle. Il faut rappeler qu'il y avait intégration d'un correcteur de neige qui nous a fait gagner à peu près 4 mm/an de neige qu'on retrouve explicitement dans la lame d'eau précipitée. Cette quantité contribue à l'écoulement à partir du mois de mars où on constate clairement dans le régime hydrologique que les écoulements deviennent importants en début de mars période coïncidant avec la fonte nivale quoiqu'on ne dispose d'aucune mesure de cette quantité, nos observations sur le terrain ont pu confirmer la réalité de la fonte nivale ce phénomène qui par ailleurs explique certains pics de crues observés sur les hydrogrammes (Cf. figure 57-69)

Pour ce qui est de l'ETR, ce paramètre est particulièrement intense dès les mois de mars, avril, mai et juin qui correspondent à la période d'absorption des réserves du sol par la végétation qui s'intensifie durant cette période.

Pour comparer les concordances des écoulements résultant des précipitations, nous avons tracé la droite de régression entre les précipitations annuelles en mm et les écoulements annuels. La relation donne un coefficient R^2 de 84 % avec quelques points qui se détachent et s'éloignent de la droite qui sans doute résultent de la mauvaise qualité des données qui s'exprime tantôt par des sous estimations ou des surestimations; Ou encore de l'hétérogénéité du bassin qui est en grande partie

karstifié ce qui va réduire la surface de l'écoulement des eaux qui ont tendance à s'infiltrer instantanément à travers l'exokarst.

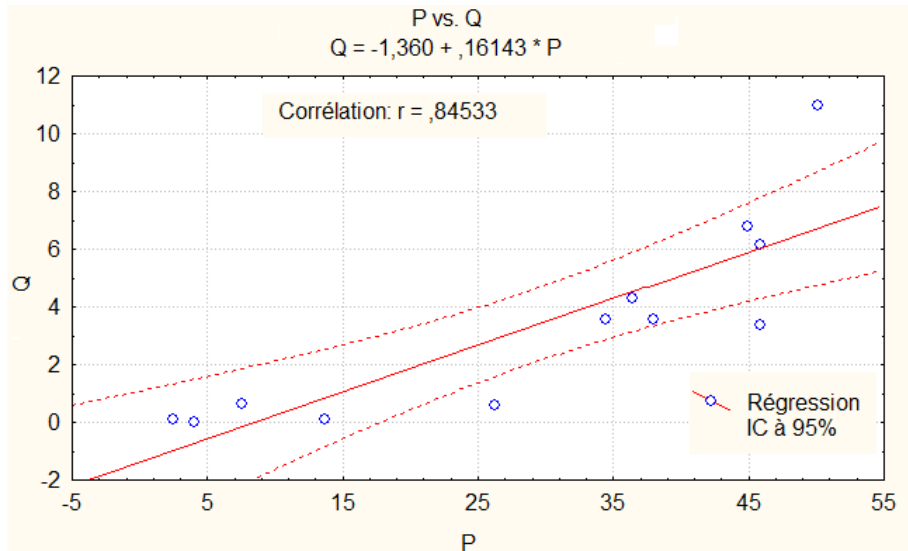


Figure.80 Régression entre les précipitations et les écoulements

5-1 Bilan mensuel sur Khemis

Ce bassin se caractérise du point de vu géologique par la présence du karst et par son altitude moyenne importante. Les précipitations enregistrent leur maximum pour les saisons hivernales, d'automne et aussi du printemps. L'évaporation réelle est importante pour le mois de mars et faible pour le mois d'Août. L'écoulement enregistre ces plus grands débits pendant les saisons du printemps mais probablement il reste un écoulement faible.

mois	ptot	e	etr	q	wb	ds
1	55,89	49,17	28,59	11,53	53,3	14,91
2	51,06	51,56	32,59	12,22	58,45	5,15
3	53,64	68,48	43,66	14,52	52,85	-5,6
4	39,52	74,14	42,48	7,29	41,88	-10,97
5	33,27	94,01	43,39	5,02	26,18	-15,7
6	8,7	114,21	24,36	1,28	9,06	-17,12
7	2,96	136,19	8,76	0,16	3,03	-6,03
8	3,9	137,74	5,27	0,02	1,61	-1,43
9	14,65	116,37	10,4	0,07	5,76	4,15
10	25,79	96,46	19,16	0,44	11,86	6,11
11	40,58	68,25	23,6	1,44	27,18	15,32
12	41,53	55,33	26,19	3,66	38,4	11,22

Tableau.11 Evaluation des éléments du bilan mensuel sur le bassin de Khemis

La variation mensuelle du régime du bilan, indique une quantité importante d'ETR pour la période allant du mois de Janvier à Mai qui coïncide avec une plus ou moins importante quantité de précipitations variant de 30 à 60 mm (Tableau.11 et Figure.79). L'évapotranspiration est plus sévère en période d'été (Juin_Septembre). Les volumes "important" de l'écoulement sont enregistrés en période d'hiver.

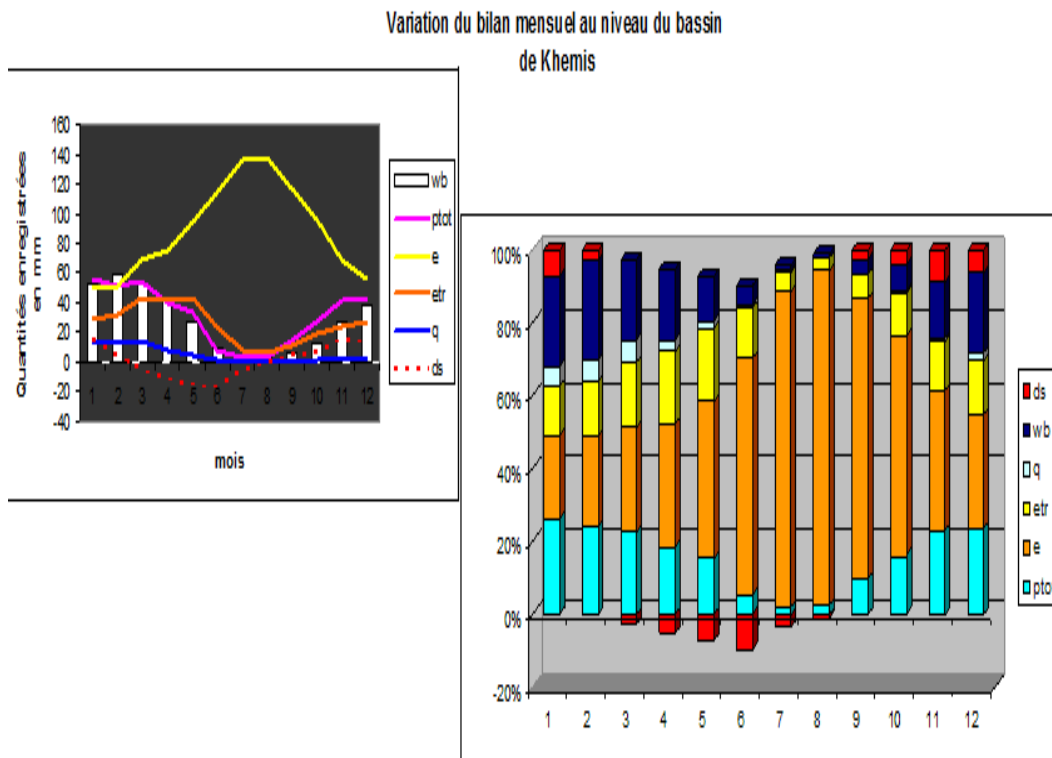


Figure. 81 Variation mensuelle des paramètres du bilan sur le bassin de Khemis

6- Conclusion

La quantité, la qualité et la répartition spatiale des données sont manifestement les trois éléments qui entravent ce travail de modélisation. Nous avons essayé de nous en accommoder en adoptant une démarche qui subordonne l'évaluation du bilan hydrologique à la cartographie des écoulements. Le modèle produit semble alors en mesure de reproduire correctement le comportement du bassin de la Tafna. A

Cette démarche a consisté à faire prévaloir deux points de vue :

Un point de vue cartographique

Ce point de vue porté par Hydrodem conjugue le support géométrique et l'application hydrologique pour extraire le plan de drainage, les cartes de pente, de variance, de bilans, Au terme de ce traitement, un premier bilan hydrologique consolidé du bassin versant de la Tafna.

Un point de vue hydrologique

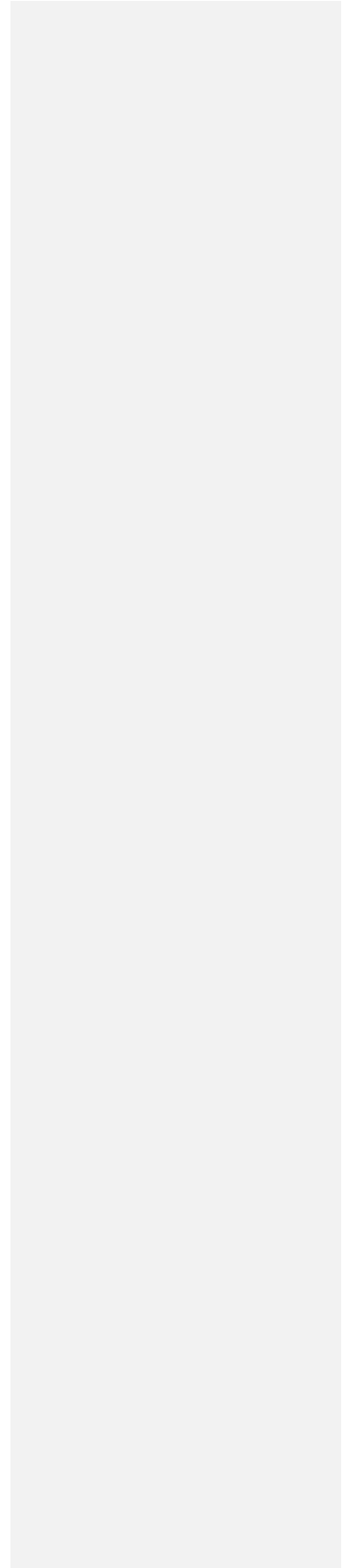
La méthodologie de calage et de validation de GR4J a été menée en adoptant des alternatives appropriées aux contraintes du bassin étudié. Ces alternatives portent sur la formulation du problème du calage des paramètres comme un problème d'optimisation d'une fonction objectif qui n'envisage pas la seule efficacité du critère de Nash mais aussi les erreurs ou les biais du bilan pour améliorer les calages et les validations. Cette fonction de type composite est une illustration de la nature multiobjectif du concept d'efficacité. Les résultats obtenus semblent prometteurs dans la mesure où l'ensemble des Nashs calculés sur les sous-bassins sont nettement améliorés par rapport à ceux obtenus sur la base du seul critère de Nash.

L'évaluation du bilan hydrologique y est réalisée, en premier, à l'aide d'une méthode géostatistique qui a permis de restituer un bilan hydrique équilibré où chaque terme du bilan (E, P, Q) est explicité selon les conditions du bassin. La seconde méthode exploite le modèle pour évaluer un bilan hydrologique acceptable du bassin, i.e. prenant en compte la précarité du système étudié. Cette application de GR4_semi-distribué a permis une évaluation du bilan du bassin que ne réalisaient pas les versions antérieures de GR4.

Ces deux approches s'apparentent à des outils d'analyse de la cohérence des données. Les anomalies peuvent y être décelées dès la spatialisation ou le calage.

Cette application de GR4J sur un bassin semi-aride avec peu de données est un cas limite d'application du modèle. D'ores et déjà, nous pouvons nous satisfaire des résultats obtenus qui étayent la distinction entre bassins productifs en amont (Khemis, Beni-Bahdel et Sikakk) et bassins non productifs en aval (Zenata et Maghnia-Frontière).

CHAPITRE V



5- Analyse de sensibilité et évaluation de la performance du modèle GR4j semi-distribué

Ce chapitre présente la partie de notre investigation qui porte sur la sensibilité du modèle GR4j aux paramètres du calage. Nous présentons, en première partie, la technique qui nous a permis d'analyser puis de discuter la sensibilité globale du modèle à ces paramètres et en seconde partie, l'analyse de l'incertitude sur les bilans hydrologiques obtenus.

5-1 Analyse de sensibilité

L'étude d'un bassin versant à l'aide d'un modèle pluie/débits est une démarche délicate compte tenu des difficultés inhérentes à la forte hétérogénéité du bassin étudié, à la disponibilité et à la qualité des données, Ces difficultés sont autant de sources d'incertitudes qui affectent le processus de modélisation. Pour pouvoir identifier puis quantifier ces incertitudes deux types de méthodes sont utilisées ZIN(2002). Les premières se réfèrent aux méthodes d'analyse de sensibilité et les secondes aux méthodes d'analyse des incertitudes.

Pour notre cas d'étude seule les premières ont été utilisées

a) Méthodes d'analyse de sensibilité

Elles permettent de définir le degré de sensibilité du résultat d'un modèle par rapport aux changements des valeurs de paramètres. Elles permettent, de ce fait, d'identifier le ou les paramètres qui affectent le plus les résultats produits par le modèle. L'analyse de sensibilité peut être appliquée sur des variables pronostiques (débits, crues,...) ou sur une fonction objectif choisie (chapitre IV).

b) Méthodes d'analyse d'incertitudes

Elles renseignent sur le niveau d'incertitude associé aux prédictions d'un modèle. L'analyse consiste à propager les incertitudes des paramètres sur le résultat final du modèle afin de lui affecter un intervalle d'incertitude ou de confiance.

5-2 Buts et principe

L'analyse de sensibilité devrait être consubstantielle à la démarche de modélisation. Tel n'est pas souvent le cas. Recourir à une telle analyse aide, d'une part, à discerner parmi les paramètres ceux ayant quelque influence sur la réponse du bassin et, d'autre part, à parer aux problèmes d'équifinalité que Beven et Freer (2001) relient soit à la structure du modèle soit à la non fiabilité des données soit encore à l'inadéquation du modèle à représenter la réalité. Le problème de l'équifinalité correspond à la situation où plusieurs ensembles de paramètres, parfois très différents les uns des autres satisfont la même fonction objectif de sorte qu'il n'est pas possible de privilégier l'un par rapport aux autres. En conséquence de quoi, ces solutions réputées équivalentes expriment un défaut d'identifiabilité que l'on impute à la non-linéarité du problème, aux interactions entre les paramètres, aux seuils de sensibilité de

certaines paramètres, ... Le calage du modèle est alors en défaut faute de disposer d'un jeu de paramètres optimaux unique.

Une analyse de sensibilité rigoureuse est subordonnée entre au choix (i) de la fonction objectif et à celui (ii) de l'algorithme d'optimisation.

5-3. Optimisation multiobjectif

Les problèmes d'optimisation rencontrés en modélisation des systèmes hydrologiques sont rarement mono-objectif en ce sens que plusieurs critères contradictoires doivent y être satisfaits simultanément. Dans la plupart des problèmes rencontrés, la solution optimale se doit de prendre pas en compte non pas *une seule* caractéristique à minimiser ou à maximiser (approche monocritère), mais *plusieurs*. Normalement, ces caractéristiques devraient être considérées simultanément pendant la recherche de la meilleure solution.

L'optimisation multicritère initiée par Pareto traite de ces problèmes qui possèdent, non pas une solution unique, mais un ensemble de solutions résultant d'un compromis entre les différents objectifs à réaliser. Ces solutions sont dites Pareto – optimales.

1- Position du problème

Un problème linéaire d'optimisation multiobjectif se décrit ainsi :

$$(1) \quad \begin{cases} \text{opt} = F(f^1(x), f^2(x), \dots, f^m(x)) \\ Ax = b \end{cases}$$

où m est le nombre d'objectifs à optimiser sous contraintes et f^j des fonctions objectifs souvent contradictoires. A est la matrice des coefficients, opt indique le sens de l'optimisation : *maximiser* ou *minimiser* et b . Une illustration de fonctions objectifs f^j utilisées en hydrologie sont celles relatives (i) au bilan (ii) à l'hydrogramme (iii) aux crues (iv) aux étiages, ... voire au niveau des nappes.

2- Terminologie

La fonction objectif F , encore appelé *critère d'optimisation ou fonction coût*, mesure la performance du modèle. Ses variables sont les paramètres du problème multiobjectif. Ils sont ajustés pendant le processus d'optimisation pour obtenir les solutions optimales. Pour cette raison on les appelle *variables d'optimisation*.

L'espace de recherche de ces variables, encore appelé *espace des paramètres*, est défini par l'ensemble des combinaisons des valeurs des paramètres. Il correspond à l'espace des solutions. L'espace des objectifs est l'image de l'espace de recherche. Il est déterminé par toutes les valeurs possibles des fonctions - objectif. Les contraintes en tant que spécifications du problème limitent l'espace des paramètres. La région de l'espace des paramètres ou des objectifs dans laquelle ces contraintes sont respectées est appelé *domaine réalisable* ou encore *espace admissible* ;

3- Solutions Pareto-optimales

Dans une optimisation multiobjectif, le but est de déterminer l'optimum de m variables conflictuelles. Bien entendu, il est impossible de définir, en toute généralité,

ce qu'est la valeur optimale d'un tel problème car il y a en fait un ensemble de valeurs optimales formant une frontière de Pareto.

Pour déterminer si une de ces solutions est meilleure qu'une autre, il convient de définir une relation d'ordre via la notion de *dominance* :

Soient X et Y deux solutions. On dira que X domine Y si, pour tout objectif f^j , on a :

$f^j(X) \leq f^j(Y)$ avec au moins une inégalité stricte.

Un point x sera alors dit **Pareto-optimal** s'il n'est dominé par aucun autre point appartenant à l'espace de recherche E . Ces points sont également appelés *solutions non inférieures ou non dominées*.

Cet ensemble de solutions constitue un équilibre, en ce sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur un objectif f^j sans en dégrader un autre. La solution Pareto consiste à obtenir le front de Pareto ou à en approximer la frontière.

A cause de ce caractère vectoriel de F , on distingue des solutions qui, en considérant tous les objectifs proposés, seront pires que d'autres. Elles sont nommées *solutions dominées ou non efficaces*.

Cette idée d'utiliser la dominance au sens de Pareto entraîne la convergence de la population de solutions vers un ensemble de solutions efficaces sans pour autant permettre de justifier le choix d'une alternative plutôt qu'une autre qui relève d'une autre problématique. Efstratiadis et al. (2010) ont présenté une excellente revue des méthodes de calage multiobjectif utilisées pour le calage des modèles hydrologiques au cours de la dernière décennie.

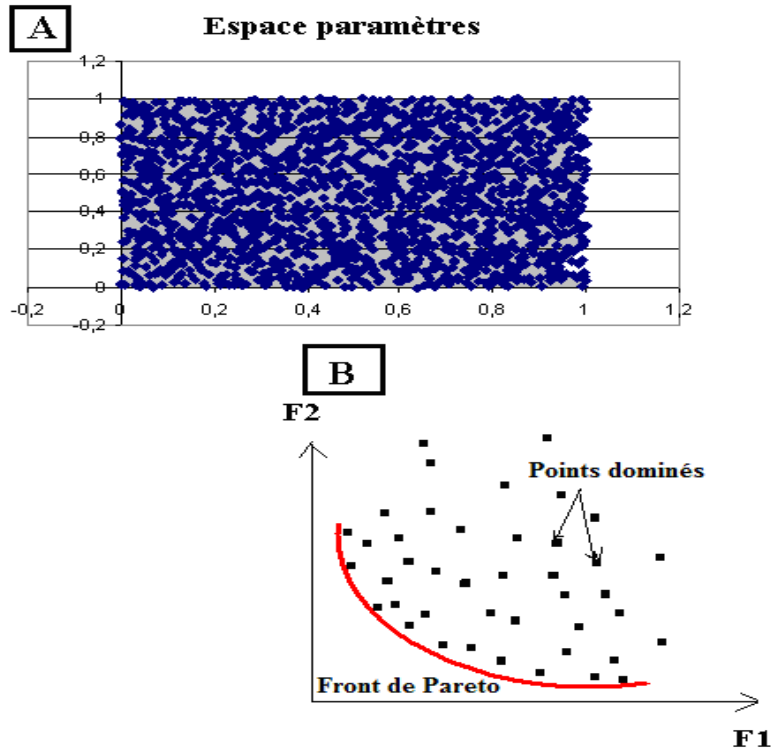


Figure. 81 Représentations de principe de Pareto.

4- Méthodes de résolution

Le choix de la méthode de résolution dépend du problème à optimiser (linéaire, non-linéaire) et de la fonction qui le représente. Ces méthodes procèdent, selon le cas, de la programmation linéaire ou de la programmation non linéaire.

Seules les techniques de programmation non-linéaire seront citées ici du fait de la non-linéarité des problèmes traités en hydrologie.

Collette et Siarry (2002) classifient ces méthodes en méthodes scalaires, méthodes interactives, méthodes floues et méthodes exploitant une métaheuristique.

Elles sont soit de type *non Pareto* du fait qu'elles ramènent le problème multiobjectif initial à un ou plusieurs problèmes mono-objectifs (méthodes d'agrégation, ϵ -contrainte, ...) soit de type *Pareto* en ce sens que les objectifs du problème posé sont préservés tels quels, sans favoriser un objectif par rapport à un autre.

Parmi ces méthodes, celles basées sur le calcul de la dérivée du problème, ou sur des approximations de cette dérivée procèdent des méthodes *déterministes*.

Elles nécessitent donc quelques informations sur le vecteur gradient et cherchent le point où il est nul, soit elles utilisent sa direction.

Un deuxième type de méthodes dites *énumératives* exécutent une recherche exhaustive par un balayage complet de toutes les solutions possibles ; ce qui, dans la plupart des problèmes, demande un temps de calcul excessif.

Le troisième type de méthodes est de nature *stochastique* en ce sens qu'elles utilisent un ensemble d'actions qui cherchent la solution optimale de façon « aléatoire orientée », sans avoir besoin d'aucune information sur les dérivées ou sur le comportement du problème.

De toutes ces méthodes, celles qui rencontrent un franc succès parce que robustes et simples à implémenter, sont celles qui utilisent les *algorithmes génétiques évolutionnaires* (Holland, 1975 ; Goldberg 1989). Ces algorithmes génétiques sous la version *élitiste* ou *non élitiste* de leurs codes : MOCOM (Yapo et al. (1998), SCEM-UA et MOSCEM (Vrugt et al. 2003), ... sont désormais d'usage de plus en plus répandu en hydrologie.

Le développement et l'application de ces codes de résolution numérique ne peut, cependant, faire l'économie de l'évaluation de la qualité des solutions produites.

5- Evaluation des performances

Si cette évaluation est triviale pour l'optimisation mono-objectif, ce n'est pas le cas pour l'optimisation multiobjectif. En effet, l'existence d'un ensemble de solutions de compromis et l'absence d'ordre total entre les solutions rendent la mesure de qualité du front de Pareto difficile.

Si la notion de dominance au sens de Pareto peut être utilisée pour comparer deux solutions, réputées incomparables, la comparaison d'un ensemble de solutions est encore plus délicate du fait que l'évaluation d'un algorithme en terme de qualité des solutions obtenues, nécessite soit de pouvoir évaluer un front avec une *métrique absolue* soit de le comparer de façon quantitative avec les fronts produits par d'autres algorithmes à l'aide d'une *métrique relative*.

Cette tâche reste, cependant mal aisée tant la notion de qualité d'un front est, elle-même, de nature multiobjectif (intensification, diversification).

Les indicateurs de performances existant supposent soit que l'ensemble des solutions potentiellement Pareto optimales est connu soit qu'il est inconnu.

Veldhuizen, (2000) propose d'évaluer comme indicateur la *proportion d'erreur* ou la *distance générationnelle* quand le front de Pareto est connu. En revanche si ce front n'est pas connu, Zitzler (1999) suggère de recourir à la *métrique C* tandis que Schott (1995) recommande une *métrique d'espacement* ...

Pour une bonne analyse, cependant, il est d'usage courant d'utiliser différentes mesures afin de pouvoir analyser à la fois la convergence et la diversité pour évaluer au mieux la surface de compromis.

Lorsque le problème traité ne comporte pas plus de trois critères, le meilleur moyen d'évaluer la surface de compromis, reste encore l'évaluation graphique.

C'est précisément le cas pour ce qui concerne l'optimisation multiobjectif que nous avons conduite pour le calage du modèle GR4j du bassin de la Tafna.

5-4. Application au modèle GR4j semi distribué du bassin de la Tafna

Dans le cadre du bassin de la Tafna, les points ont été pris régulièrement sur chaque dimension puis nous avons permuté aléatoirement les hyperplans selon toutes les dimensions. A cet effet, nous distinguons les U_i , comme coordonnées uniformes, et les X_i , comme paramètres effectifs. Quand on évoque la paramétrisation effective, on suppose qu'il y a une transformation des points de l'ensemble $]0,1[$ vers l'ensemble de définition approprié pour chaque paramètre, à la fois en valeurs extrêmes et en distribution.

Dans un premier temps, nous avons effectué un tirage d'un jeu de paramètre de 2000 points dans un intervalle à partir duquel nous avons trouvé 23 jeux de paramètres non dominés. Ces 23 jeux de paramètres permettaient de localiser très approximativement la zone où se trouvait le front de Pareto. On a ensuite repris avec 10000 points dans le carré latin, fournissant environ 150 solutions non-dominées. Devant le faible rendement de cette exploration brute, il a été décidé de procéder à un échantillonnage (proposition propre à E. Leblois) de 10000 points non dans le carré latin complet mais au voisinage de l'ébauche constituée par ces 150 solutions non dominées. En deux-trois itérations on peut ainsi obtenir un nombre important (5000) de solutions non dominées. Cette dernière technique est intuitive ; elle a été proposée et employée pour la première fois dans cette étude et nous n'avons pas pu vérifier si d'autres l'ont appliquée avant nous.

1- Evaluation de la performance

Nous avons considéré les paramètres X_1 , X_2 , X_3 , X_4 des GR4 utilisés comme fonction de production calculée sur chaque sous-bassin ; ces paramètres sont les mêmes sur tout le domaine modélisé, et pour chaque sous bassins contrôlé. Il faut rappeler qu'on garde comme constante les valeurs de célérité et de diffusivité (1.8 et 0.8) comme pour les calages . Ces valeurs ne sont PAS soumises à l'analyse de Pareto.

Les étapes adoptées sont résumées, ci-dessous;

1- Premier étape

Nous avons rajouté en plus des quatre paramètres de GR4J deux autres paramètres, X_5 et X_6 caractérisant :

X_5^* : un biais dans les températures mensuelles. Ce choix résulte de deux idées 1/ les températures mensuelles parfois proches de zéro en hiver pourraient cacher certains jours une température négative, et donc la possibilité d'une création de neige ; 2/ la position particulière de la seule chronique de température à Maghnia frontière ne la rend pas forcément représentative de l'ensemble du bassin. X_5 introduit la possibilité d'un biais de représentativité. Nous avons modélisé avec cette hypothèse puis calé le biais retrouvé pour le corriger.

X_6^* : On sait qu'il existe un gradient adiabatique représentant ainsi un changement de température avec l'altitude : il fait plus frais en montagne. En air saturé (soit une

situation de type européenne, atlantique, humide...) ce gradient est évalué à $-0.65C$ pour $+100$ m d'altitude. Par contre, en air non saturé (sud de la Méditerranée) on peut observer près de $-1C/100m$. Nous avons donc voulu étudier l'impact du choix de ce gradient sur les résultats du modèle.

L'analyse de sensibilité menée l'est donc à l'échelle de l'ensemble de la Tafna, avec un seul jeu de paramètres pour l'ensemble du bassin. Six paramètres sont pris en compte : les 4 paramètres de GR4J ainsi que les paramètres X5 et X6 mentionnés plus hauts. La période de simulation est la période 1976-2006].

Comme rappelé aussi plus haut, le critère utilisé pour la fonction objectif est le critère composite à partir du Nash et du biais introduit dans le chapitre IV. Dans la recherche du jeu de Pareto, nous avons considéré l'optimisation conjointe de ce critère sur les 5/6 bassins suivants :

2- Sensibilité des paramètres

La figure.93, représente un premier résultat obtenus, il en ressort que :

-On définit sur le graphe _1, l'intervalle des solutions de tous les paramètres calculées. Chaque paramètre est bien localisé dans son espace a priori proposé pour les solutions possibles. Seul le paramètre X6 qui ne délimite pas un domaine préférentiel, il occupe tout le domaine qui lui a été affecté .

- les paramètres qui sont bien définies dans le domaine sont : X1, X2 et X5 par rapport à X6, pour les autres paramètres X4 et X3, on arrive pas à distinguer s'ils présentent vraiment des sensibilités.

- La relation la plus pertinente reste réservée au cas de X5_X6. Nous constatons que si on veut diminuer les températures, on devait augmenter le gradient altitudinal et vice versa. Les biais des températures moyennes admis dans le domaine de Pareto sont compris dans l'intervalle 0 à -4 C. Les gradients adiabatiques significatifs quant à eux sont compris entre -0.5 à 1.1 .

On voit donc que ces deux paramètres X5 et X6 sont liés , ceci attirant notre attention sur le caractère redondant de telles corrections. Dans l'optimum de Pareto sont gardés les jeux de paramètres représentant d'une manière ou d'une autre (mais peut-être pas des deux manières à la fois) refroidissement significatif en fonction de l'altitude.

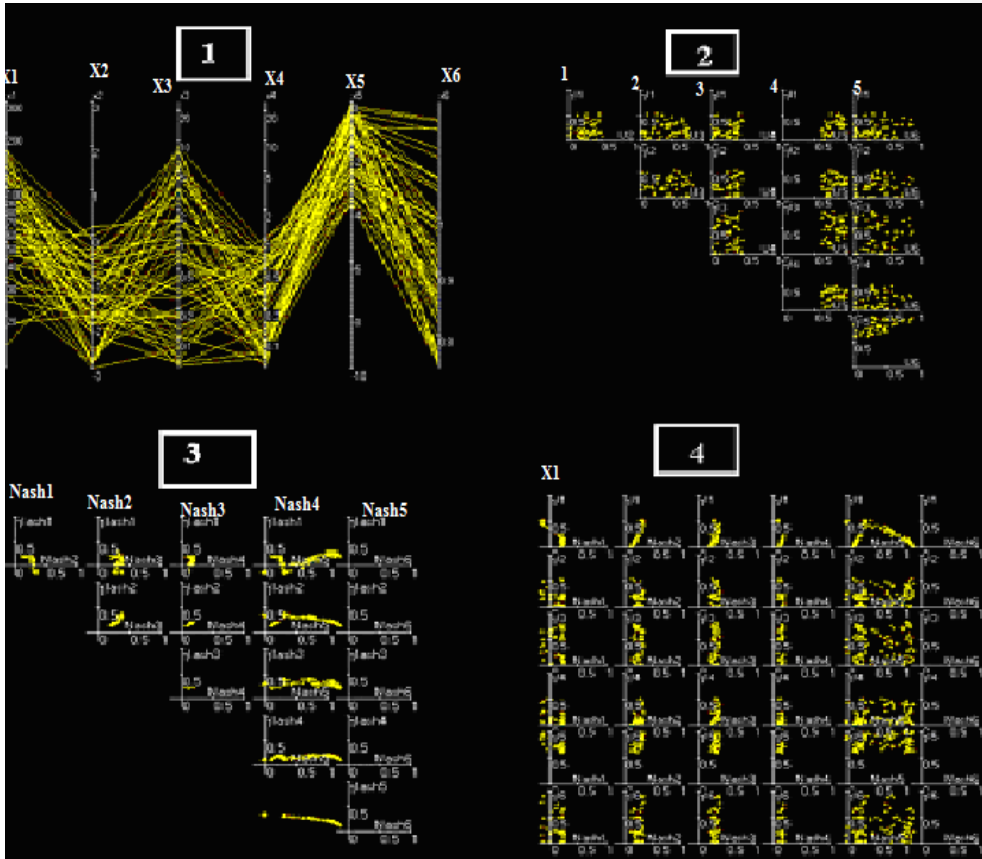


Figure. 82 Résultats d'application de la fonction objective de Nash-Sutcliffe habituelle Considérées sur chacun des 6 bassins contrôlés (la 6^e est Mouilah-avant-barrage). Les enveloppes de Pareto sont déterminées en les maximisant

-La partie _2 de la figure.93 citée, permet d'observer la possibilité de compensation des paramètres entre eux. Les paramètres X5-X6 sont représentés par U5-U6 en bas du graphique, on constate qu'ils conservent bien l'idée de l'existence d'un gradient adiabatique sensible au changement de température et d'altitude. Pour les autres paramètres, on distingue moins bien les compensations qui peuvent les concerner.

- La partie_3 de la figure.93 montre la sensibilité des stations les unes par rapport aux autres : sur une telle représentation, on est censé déceler le fait que l'amélioration sur une station peut imposer de dégrader les résultats sur une ou plusieurs autres. les tendances ou qui compense sur qui.

- La partie_4 de la figure.93 montre par contre la sensibilité de la première station + Nahs1 au paramètre X1, toute diminution du Coefficient Nash va entraîner l'augmentation de la réserve du sol (X1). C'est en quelque sorte une affirmation de la préférence, pour chaque station, pour telle ou telle valeur de paramètre.

3- Visualisation des résultats de l'analyse de la sensibilité sur les simulations

Pour les différentes simulations correspondant à des jeux de paramètres conservés par l'analyse de Pareto, il est possible de tracer la chronique reconstituée en chaque bassin. lors de l'étape de validation /calage (Cf. Chapitre IV), nous avons observé que les sous bassins en reliefs étaient les mieux représentées et les systèmes qui présentaient des anomalies étaient toujours les moins significatifs. Pour cette raison, nous prenons ici un exemple de chaque type de résultat, un exemple sur un sous bassin raisonnablement modélisé (Khemis) et un sur un autre système plus difficile, moins bien décrit (Zenata). (figure.94)

On observe pour la première représentation que les débits observés sont bien intégrés dans le faisceau des solutions de Pareto. Ce qui veut dire que sur le bassin de Khemis, le modèle arrive bien à reproduire les débits. Par contre, la réserve hydrique de GR4 est largement inconnue et fluctue beaucoup selon la solution adoptée. Ceci vient du fait que le modèle ne dispose d'aucune information de stock du sol dont le respect aurait pu être exigé par son inclusion dans le critère de Pareto. Le modèle est libre à cet égard.

Le second graphe, extrait sur le bassin de Zenata, montre que les courbes de débits observés se trouvent hors du domaine balayé par les chroniques sélectionnées par le front de Pareto. Ceci signifie que le modèle n'arrive pas à simuler ces débits de façon correcte, fut-ce au prix d'une dégradation des résultats sur les autres bassins. Ce bassin présente donc des anomalies qu'il n'est pas possible de simuler, même en jouant sur les jeux de paramètres du modèle GR4.

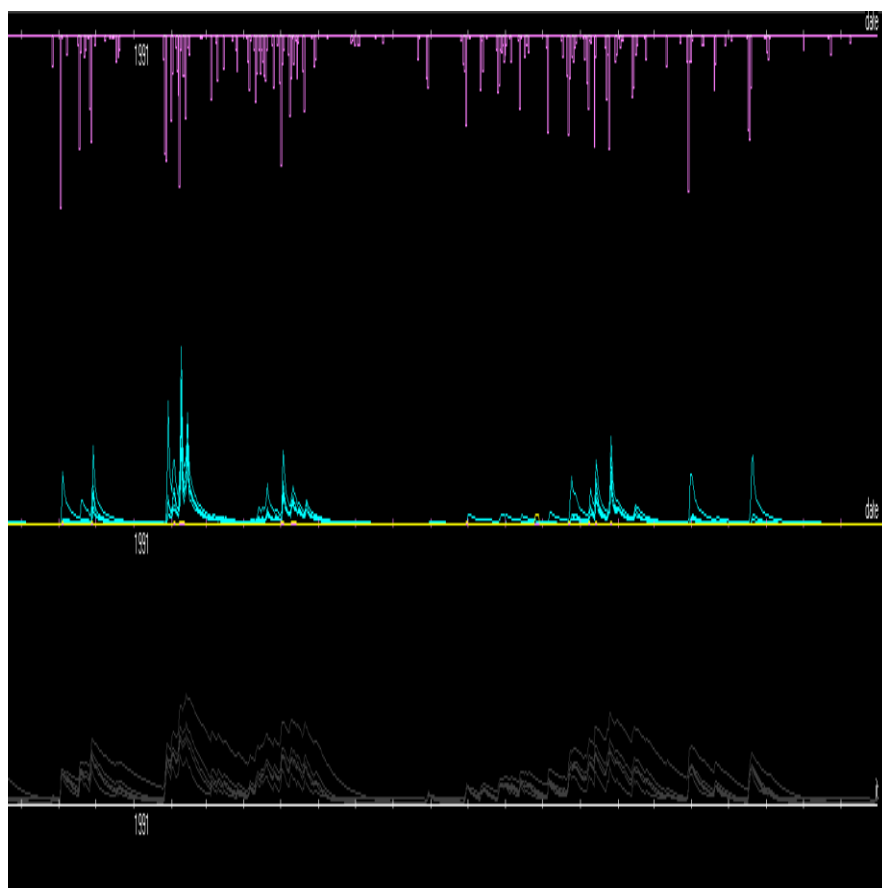


Figure. 83 Exemple de chroniques reconstituées.

- A) Sur le bassin de Khemis
- B) Sur le bassin de Zenata

5-4 Vers une méthode alternative de re-échantillonnage

Ce que nous proposons, dans ce qui suit, est un procédé non habituel dans l'analyse de l'optimisation multiobjectif proposée par E.Leblois pour réintégrer le maximum de solution de Pareto. Le principe consiste à effectuer l'échantillonnage habituel. Une fois le set de Pareto déterminé, on re-échantillonne une seconde fois au voisinage des solutions Pareto, la figure.95 récapitule les résultats retrouvés.

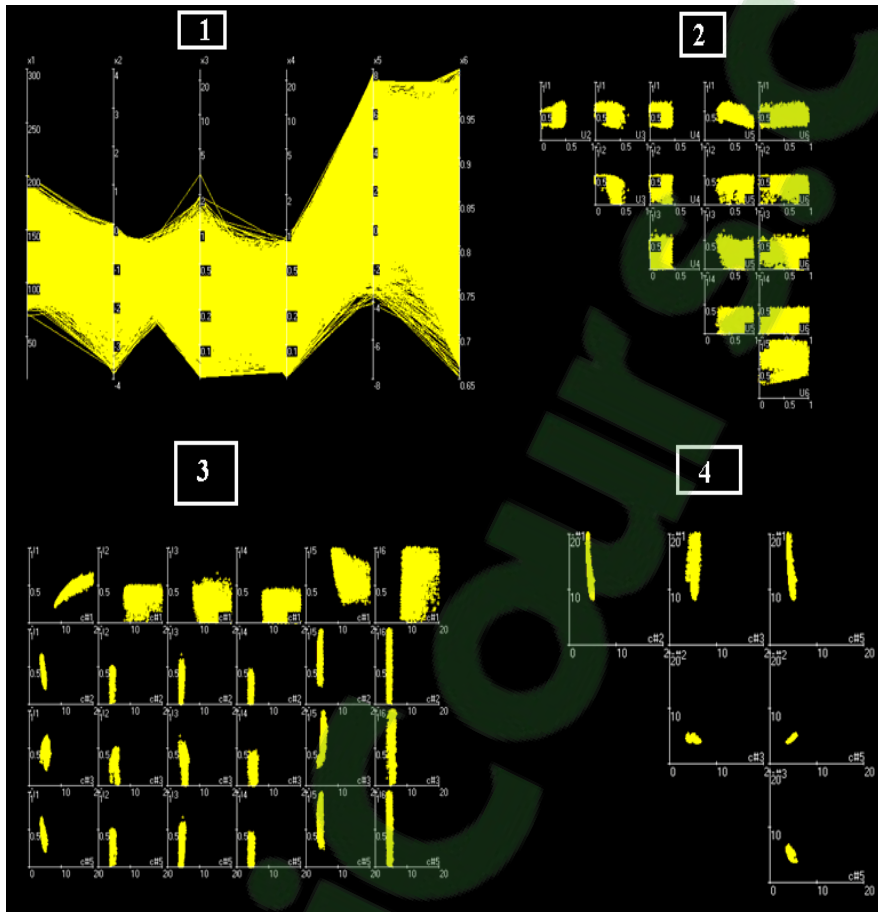


Figure. 84 Résultats d'application de la fonction objective après re-échantillonnage.

Sur un nombre de valeurs initiales de 10000, nous avons trouvé 50 set de Pareto, le re-échantillonnage autour des solutions trouvées a donné, en deux étapes, plus de 5000 points tous non dominés. On observe bien les limites de chaque paramètre sur la figure_1 puis, et on voit bien la dépendance des deux paramètres X5_X6. Les

tendances deviennent de plus en plus distinctes entre les bassins : par exemple entre Nash du bassin 1 qui est Mouileh –Frontière avec le paramètre 1 (réserve du sol) puis entre les bassins 5 - 1et 1-2 qui sont représentés sur la partie_4 du graphe. Cette relation veut dire que si on essaye de diminuer les Nash sur le bassin 5 qui est celui de Sikkak on aura une augmentation du Nash du bassin de Mouileh-frontière.

Les résultats sur les simulations sont aussi importants pour le bassin de Khemis où le modèle reproduit bien le fonctionnement du bassin (Figure 85 A et B). En revanche, le modèle reste moins performant pour le bassin de Zenata

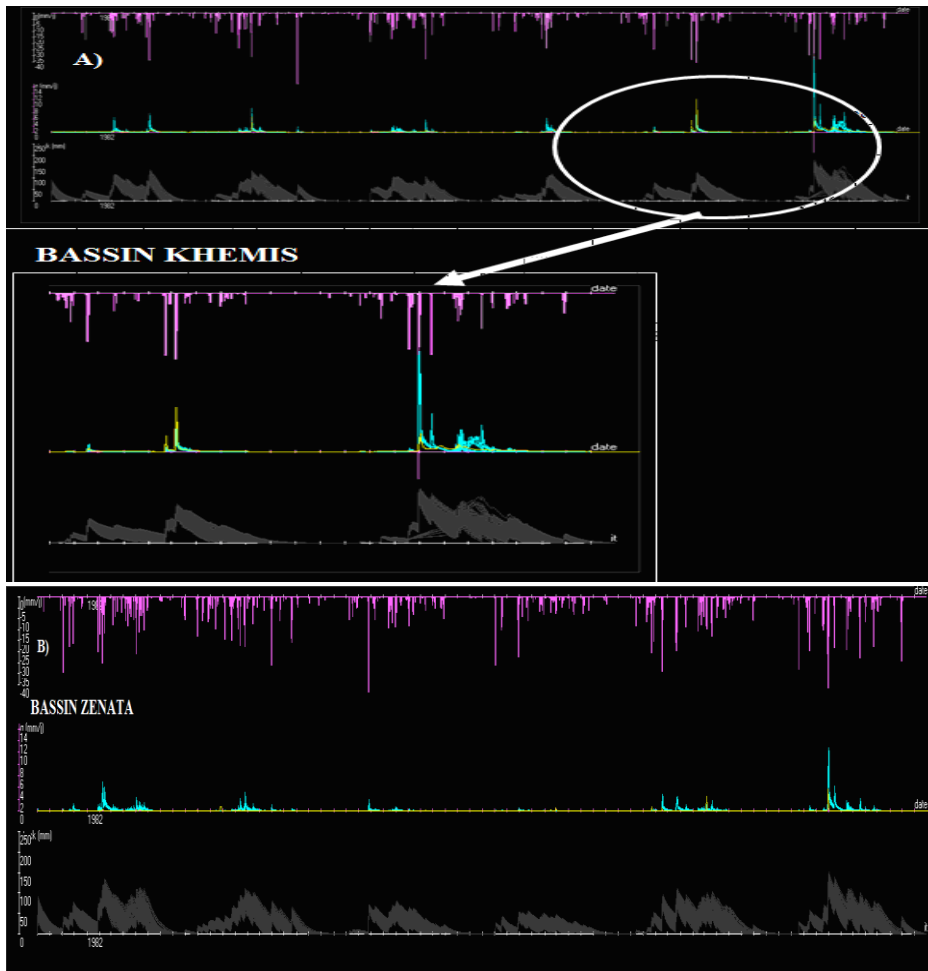


Figure. 85 Exemple de chroniques reconstituées. A) Sur le bassin de Khemis B) Sur le bassin de Zenata

Les graphiques standards deviennent insuffisants pour bien visualiser ce qui se passe à l'intérieur de chaque intervalle de paramètres, en raison du nombre de points du front de Pareto. Nous avons tracé les densités sur chacun des paramètres étudiés. La figure.86

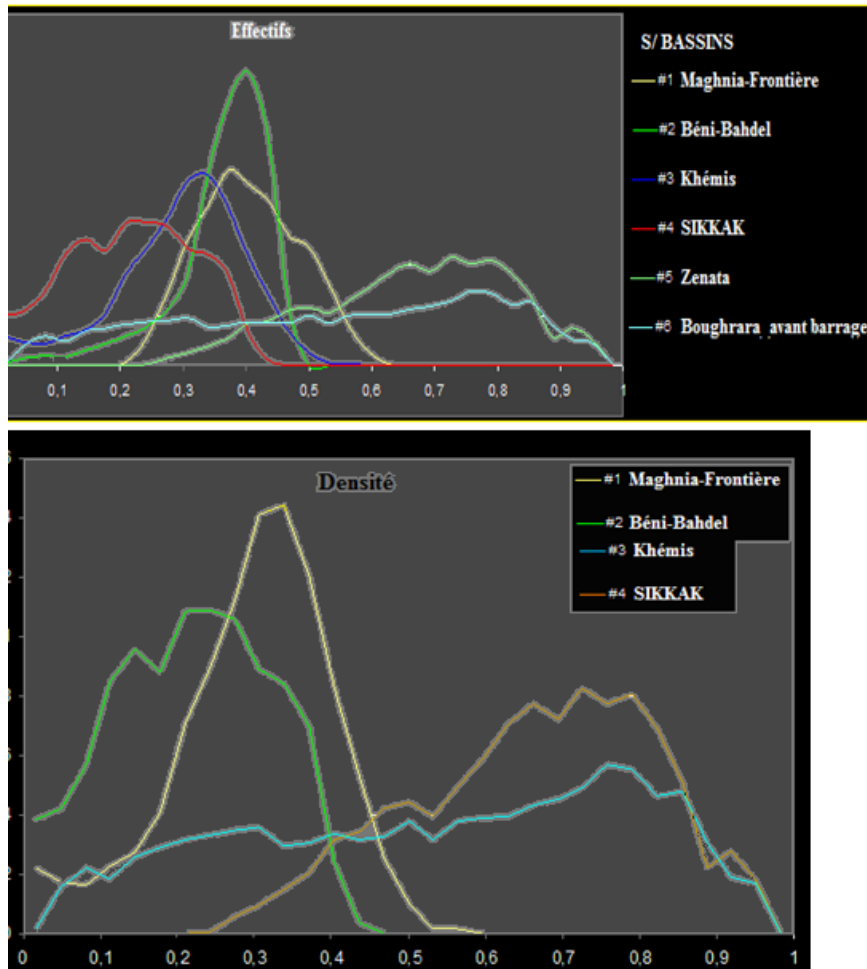


Figure. 86 Représentation des effectifs et des densités

La première figure montre que l'intervalle sur le paramètre X1 (représentée en couleur bleu) est bien défini dans son intervalle à contrario des autres paramètres qui sont moins bien définis. Les densités bi-variées peuvent également être tracées.

5-5 Sensibilités sur le bilan

Pour chaque jeu de paramètres présent dans le set de Pareto, il est possible de mémoriser le bilan hydrologique sur chaque bassin. Le tableau qui suit donne la moyenne et l'écart-type des principaux termes mensuels et annuels pour le bassin #3. Les valeurs sont en mm (sur le mois ou l'année).

MOIS	p	m_etr	s_etr	cv_etr	m_q	s_q	cv_q	variation de stock
janvier	55.89	32.24	3.494	0.108	9.921	1.219	0.123	13.72
février	51.06	35.50	2.733	0.077	9.471	1.285	0.136	6.09
mars	53.64	45.40	1.697	0.037	12.313	1.631	0.132	-4.07
avril	39.52	41.72	1.675	0.040	6.123	0.685	0.112	-8.32
mai	33.27	40.85	2.885	0.071	3.891	0.546	0.140	-11.47
juin	8.70	19.37	4.743	0.245	1.061	0.119	0.112	-11.74
juillet	2.96	5.75	2.317	0.403	0.129	0.019	0.144	-2.92
août	3.90	4.52	0.451	0.100	0.014	0.002	0.136	-0.63
septembre	14.65	12.34	0.360	0.029	0.102	0.023	0.229	2.21
octobre	25.79	20.70	1.119	0.054	0.390	0.072	0.186	4.70
novembre	40.58	25.89	2.133	0.082	1.345	0.269	0.200	13.34
décembre	41.53	29.21	2.879	0.099	3.276	0.480	0.146	9.04
année entière	371.50	313.51	8.121	0.026	48.037	4.939	0.103	9.953
moyenne des mois	30.96	26.13	2.207	0.112	4.003	0.529	0.150	0.83

Tableau.12 : bilan hydrologique (régime) du bassin#3 instrumentés, et son incertitude évaluée sur la base du set de Pareto final (constitué de plus de 5000 jeux de paramètres non dominés).

On peut faire les observations suivantes .

Ici, le jeu de Pareto est construit sur le critère mixte aux stations 1,2,3,4,5, de façon à ne pas le pénaliser par la station de Zenata.

- la pluie, qui est connue par hypothèse, ne présente pas de variabilité ; c'est une limite de l'analyse de Pareto qui ne s'intéresse qu'à l'incertitude sur les termes calculés par le modèle, alors qu'on sent bien que les pluies elles-même sont incertaines .

- seuls les principaux termes du bilan sont repris dans ce tableau simplifié (P, ETR, Q) ; la variation de stock moyenne en est simplement déduite ;

- l'ETR est relativement stable (coefficient de variation de l'ordre de 0.10 en valeur mensuelle et 0.03 en valeur annuelle), ce qui est compréhensible puisqu'elle est physiquement première servie, ce que la formulation de GR4 respecte.

- le débit Q est relativement moins bien défini (coefficient de variation de 0.20 en valeur mensuelle, 0.10 en valeur annuelle).
- ce résultat est très intéressant dans la mesure où le critère de Pareto ciblait le respect du débit ; au final il y a donc peu d'incertitude sur l'ETR. La statistique éclaire, mais ne bouscule pas la « physique » du modèle.
- sur un autre terme dérivé (le stock d'eau hydrologiquement actif) les variations sont beaucoup plus grandes (non démontré ici, mais visible sur les chroniques du point précédent) la « contribution au stock » évaluée sur les flux de surface (P-Q-ETR) a un cycle mensuel évident ; son cumul annuel, relativement modeste, serait en principe (perspective) à rapprocher des infiltrations profondes (X2), prélèvements, ... ; on laisse ceci en perspective, cependant, car d'autres facteurs peuvent jouer (sous-estimation éventuelle de l'ETP, erreurs sur les courbes de tarage toujours possible) et il serait prématuré de proposer autre-chose que des hypothèses.

5-6 CONCLUSION

A travers ce chapitre, nous avons essayé de discuter la sensibilité du modèle GR4semi-distribué à travers l'étude de l'optimisation multiobjectif à partir de laquelle nous avons pu évaluer l'efficacité du modèle proposé qui demeure intéressante pour certains bassins de la Tafna se situant en altitude : Khemis, Béni-Bahdel et Sikkak, il est moins performant par contre, sur les bassins de : Zenata et Maghnia-frontière. L'investigation que permet l'analyse de Pareto de l'ensemble des paramétrisations possibles est intéressante. Elle donne une image très claire des liens existants entre les critères à optimiser, les paramètres, et surtout du fait qu'on ne peut pas obtenir des bons critères d'optimisation sur l'ensemble de stations si les données ne sont pas cohérentes, en utilisant une modélisation conceptuelle qui se veut cohérente.

RECOMMANDATIONS ET CONNCLUSION GENERALE

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION GENERALE

1-Recommandations

Cette étude constitue une première application d'un modèle hydrologique dans un contexte hydroclimatique très particulier et complexe. Notre travail servira comme document de base et ouvre plusieurs perspectives.

Le modèle semi-distribué pourrait être amélioré si d'autres stations à l'exutoire et au niveau des grands affluents de la Tafna (Oued Isser) sont intégrés. Le manque de données au niveau de ces zones limite relativement notre compréhension de leur fonctionnement. Un renforcement du réseau de mesure soit pluviométrique ou hydrométrique sur l'ensemble du bassin de la Tafna serait très nécessaire et indispensable pour mieux cerner, entre autres, le problème d'incertitude sur les données. L'étude de la sensibilité pourrait aussi être améliorée, d'une part, si la donnée de l'humidité du sol était prise en considération, son intégration pourrait permettre de réduire l'incertitude sur la variation de la réserve du sol représentée dans GR4j par le paramètre X1 qui reste pour notre cas un paramètre très sensible au modèle.

2- Conclusion générale

Notre travail apporte une contribution originale aux peu de travaux de modélisation hydrologiques entrepris jusqu'à ce jour sur le bassin de la Tafna. Cette étude représente une première application d'un modèle hydrologique en l'adaptant aux différentes contraintes que subit le bassin étudié. Nous avons essayé de démontrer qu'une démarche de modélisation pluie/débit est envisageable sur le bassin de la Tafna malgré la faible couverture spatiale du réseau de mesures.

Avant d'entamer la modélisation, il nous a fallu identifier la variation des écoulements sur le bassin étudié notamment sur ses sous bassins à travers des analyses conjointes de débits et de pluies.

Les résultats ont permis de dresser un diagnostic synthétisant les différents comportements du bassin qui ont servi d'éléments de base pour la mise en œuvre du modèle hydrologique.

Les résultats obtenus peuvent être synthétisés de la manière suivante:

1- L'état des écoulements dans le bassin de la Tafna

Dans un premier temps, nous avons recherché à mieux comprendre le comportement du bassin par rapport aux différents termes du bilan hydrologique. Cette première étape nous a aidé à mieux cerner notre connaissance relative au fonctionnement du bassin et à l'améliorer. L'analyse de la variabilité de ces éléments a abouti aux résultats suivants;

1-1Précipitations

Obtenir des données de précipitations fiables sur le bassin de la Tafna nous a demandé beaucoup de travaux de corrections. La pluie constitue la pièce maîtresse de toute approche hydrologique mais elle reste tout de même inconnue sur certaines parties du bassin notamment dans la partie marocaine.

Nous avons défini que la pluviométrie dans le bassin de la Tafna est régie par un gradient altitudinal que nous avons confirmé et appuyé par les tests statistiques de Wilcoxon-

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION GENERALE

Mann-Whitney. La variabilité interannuelle des pluies reste importante entre les stations en relief et en plaine avec une distribution saisonnière modérée les périodes de pluviométrie faible voire quasi-nulle caractérisent les mois secs d'été [Juin, Juillet, Août].

Les résultats de tendance linéaire sur les précipitations ne révèlent aucune tendance significative ni même de date de rupture bien prononcée sur la période étudiée 1976-2006. En revanche, la tendance à la hausse est bien nette pour les températures de printemps.

1-2Débits

L'analyse de cette variable nous a permis d'obtenir quelques résultats originaux concernant le régime des débits et des débits de base représentés par le Base Flow Index (BFI) dans le bassin de la Tafna.

Les plus fortes valeurs de BFI sont détectées uniquement au niveau des formations karstifiées qui constituent les zones à fort potentiel de stockage. Cet état crée une distinction assez marquée entre différentes zones du bassin, ce qui influe sur la variabilité des débits.

Le régime des sous-bassins en altitude est simple avec un maximum des écoulements au printemps qu'on associe à une partie de la fonte des neiges.

Le régime des bassins de plaine présente quant à lui deux périodes d'écoulements importants : en hiver et un peu plus au printemps. L'analyse de la structure des crues par les hydrogrammes unitaires normés et le coefficient de l'hydraulicité ont mis en évidence que cette zone du bassin est le siège de crues violentes et de courte durée.

L'étude des tendances sur les différentes chroniques a révélé que les débits annuels, les débits de base et les BFI sont affectées par des tendances à la baisse, exclusivement sur les bassins en relief. Le premier bassin touché par la rupture est le sous-bassin de Sikkak (depuis 1982) suivi du sous-bassin de Khémis (depuis 1991). L'explication la plus logique aux différentes tendances à la baisse détectées est liée aux prélèvements importants, que nous avons mentionnés en introduction. Il est vrai que nos résultats confirment l'existence d'un changement mais qui n'est pas généralisé sur la totalité du bassin. Il faut signaler que l'écoulement dans le bassin de la Tafna est confronté en grande partie aux problèmes des activités anthropiques. Il peut même être la principale source qui perturbe de plus en plus l'écoulement dans ce bassin.

2-Vers une évaluation variée du bilan hydrologique par consolidation géostatistique et par modélisation pluie-débit

La faible distribution et disponibilité de la donnée ont été les principaux critères pour le choix du modèle GR4j-semi-distribué implémenté sous HydroDem.

Les différents résultats issus de l'application du modèle sont résumés comme suit:

Une nouvelle alternative dans la méthodologie de calage et validation a été proposée ce qui nous a permis d'ouvrir plusieurs horizons de réflexions notamment sur la façon d'explicitier la fonction objectif qui se basait classiquement sur l'analyse de l'efficacité « Nash ». Nous avons montré que cette fonction peut être composite en la conjuguant au biais. Cette pratique améliore non seulement les calages et les validations mais aussi détecte les anomalies et

RECOMMANDATIONS ET CONNCLUSION GENERALE

permet une critique des données utilisées. Ce travail de thèse représente une première application de ce concept composite. Grâce à ce choix, l'ensemble des Nashs calculés sur les sous-bassins étudiés, ont été nettement améliorés.

Par ailleurs, les bilans sur le bassin de la Tafna ont été évalués selon deux approches différentes :

-La première s'appuie uniquement sur des fondements de la géostatistique et les données existantes. Elle a permis la restitution d'un bilan hydrique équilibré où chaque terme du bilan (E, P, Q) a été explicité selon les conditions du bassin.

-La seconde basée sur le modèle hydrologique proprement dit. L'application de GR4j_semi-distribué nous a permis d'évaluer le bilan. Cette utilisation du modèle GR4J n'est pas courante car il est le plus souvent uniquement utilisé pour simuler la relation pluie-débit.

Ce travail permet de conclure qu'un modèle semi-distribué est le mieux adapté pour un bassin peu instrumenté avec une hétérogénéité spatiale comme l'est le bassin de la Tafna.

L'application du modèle semi-distribué a été complétée par une analyse de sensibilité au modèle et aux paramètres obtenus. La performance a été définie par l'application des méthodes multiobjectifs. Le modèle est efficace pour les sous bassins de la Tafna en altitude [Khemis, Béni-Bahdel et Sikkak]. Par contre, il reste moins performant pour les bassins en plaine [Zenata et Maghnia-frontière]. Cette situation peut être la conséquence de la mauvaise qualité des données des précipitations et des débits déjà signalées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adjim, H.,(2004) Evaluation et affectation des ressources en eau de surface du bassin versant de la Tafna : Approche pluviométrique », Mem.Magister. Univ. Tlemcen,150 p.
- Agence des bassins hydrographiques « ABH » (2006) Bilan des ressources en eau en Algérie. Rapp. A.B.H. <http://www.abhoranie.dz/bdd/reseau.htm#bge>
- Ambroise, B., (1998) La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant -Processus, Facteurs, Modèles. *H*G*A* (Ed.), Bucarest, 200 p.
- Azzaz,H.,Cherchali.M, Meddi.M, Houha.B, Puig.Jm et Achachi, A., (2008) The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen Mountains, northwest Algeria Hydrol.scie. n°16, pp.531-546.
- Bakreti, A., Braud, I., Leblois,E., & Benali ,A., (2013) Analyse conjointe des régimes pluviométriques et hydrologiques dans le bassin de la Tafna (Algérie Occidentale). Hydrological Sciences Journal .HSJ-2011-0078.R1
- Banque mondiale. Groupe pour le développement socio-économique Région Moyen-Orient et Afrique du Nord (2007) République algérienne démocratique et populaire. A la recherche d'un investissement public de qualité.Revue des dépenses publiques. Vol. n°1. Rapport n°36270. World Bank. Washington. DC
- Beaulieu, C., (2009). Homogénéisation des séries de précipitations : identification des techniques les plus prometteuses et nouveaux développements. Doctorat. Thèse Univ,Québec INRS-ETE, 299P.
- Benblidia. M, et Thivet. G (2010) Gestion des ressources en eau: Les limites d'une politique de l'offre. Rapp. Analys. CIHEAM. n°58, p15.
- Benest, M. (1985) Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord - Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse, Doctorat, Lab., Géol. Univ, Lyon. Fasc. 1., 367 p., 107 fig.
- Benest, M., Bensalah, M., et Truc, G.(1986) Mise en évidence de l'Eocène continental à Bulimes dans la série détritique du djebel, Mékaïdou, près d'El Aricha (hautes plaines de l'ouest algérien). 6e Sémin. Nat. Sci. Terre, Alger, p.37.
- Benest, M., (1990). Importance du contrôle tectonique de la sédimentation au Tithonique inférieur dans l'avant - pays oranais (Algérie); exemple des monts de Tlemcen et de Saïda. Soc. Géol. Nord, Villeneuve d'Ascq, CVIII, p. 155 – 163. 5 fig.
- Benkaci, T.A., & Dechemi, N., (2004) Modélisation pluie-débit journalière par des modèles conceptuels et "boite noire"; test d'un modèle neuroflou. *Hydrological.Sciences.J.*, 49(5)
- Bensaoula.F, Adjim;H (2006) Synthèse sur les forges hydrauliques profonds de la zone frontalière Algéro-marocaine. Larhyss journal. Iss1112-3680.Vol.n°5, pp.33-39
- Benyahia,M., Bechlaghem.N, Habi.M., et Kerfouf.A., (2009) Importance des ressources hydriques de la wilaya de Tlemcen dans le cadre de l'Oranie (Algérie Nord-Occidentale) et perspectives de développement durable. 5^{ème} Coll. Energies, Changements Climatiques et Développement Durable.Tunisie
- Bessaoud,O., (2008) Changement climatique et agriculture au Maghreb. Sem. Régional "Changement climatique en Méditerranée". MPM. Pharo. Marseille.
- Beven, K. and Freer, J., (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249 : 11-29.
- Blöschl, G., (2005) Rainfall-runoff modelling of ungauged catchments. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, (2005), in press,
- Bois, Ph., Obled, Ch. & Zin, I., (2007) Introduction au traitement des données en
- Bois, Ph., (2000) Hydrologie générale. Cours. Ecole d'hydraulique et de mécanique de grenoble. 180p.
- Bouanani. A (2004) Hydrologie, transport solide et modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna. Th. Doct. Es-sciences, Univ. Tlemcen, 250 p.
- Boudjadja. A (2003) Ressources hydriques en Algérie du Nord. *Rev. Sci. Eau*, 16(3), 2003, pp.28
- Boutoutaou, D., Belagoune, F., et Saggai, S., 2011 Etude des crues des bassins versants arides et semi-arides de l'Algérie. Bassins, d'El Honda, de Chott Melghir et des Hauts plateaux (Bassins : 05-06-07) *Annales des Sciences et Technologie* Vol. 3, N° 1, Juin 2011.5-304
- Brunet-Moret, Y., (1971) Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. *Cala. O.R.S.T.O.M., Sér. Hdrol*, vol. VIII, no 4, 29p.
- Castellier, E., (1993) Dérive externe et régression linéaire.
Compte-rendu des Journées Géostatistique, *Fontaine bleue*, pp.47-59
- Chapman, T. G., (1991) Comment on evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses, by RJ Nathan and TA McMahon. *Water Resources Research*, 27(7), 1783-1784
- Clarke, R.T., (1973) A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, 19, 1-20.
- Collette Y. and Siarry P. (2002) Optimisation multiobjectif. Eyrolles.
- Collignon B. (1986). Hydrogéologies appliquées des aquifères karstiques des monts de Tlemcen. Thèse de doctorat, Université d'Avignon. France.
- Cressie, N., (1993) *Statistics for spatial data*. Wiley, New-York, revised edition.
- Dakkiche, A., (2004) Contribution à l'étude des régimes hydrologiques des bassins versants de la Tafna. Evaluation du bilan des ressources en Eau superficielles. Mém. Magister. Univ. Oran. USTO, 114p.
- Dechemi, N., Bermad, A., et Hamriche, A., (1994) Simulation des débits moyens mensuels en zone semi-aride par l'analyse en composante principale (ACP). *Hydro. Continent*, vol. 9, n°1, 1994:17-24
- Degré, A., Dautrebande S., Sohler C., Debauche, O., (2008) Statistique des extrêmes dans les bassins faiblement jaugés : application d'un modèle global pluie-débit à cinq bassins versants en région wallonne (Belgique) *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2008 12(4), 379-391
- Dubreuil, P., (1974) Initiation à l'analyse hydrologique.
Edit, *Masson & Cie* et O.R.S.T.O.M., Paris., ISBN: 2-225 40 140-3., 224p.
- Efstratiadis & Demetris Koutsoyiannis (2010) One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 55:1, 58-78

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Elmi,S,. (1972) L'instabilité des monts de Tlemcen et de Rhar - Roubane (ouest algérien) pendant le Jurassique. Interprétation paléogéographique. C. R. Acad. Géol. France, Paris. pp. 1521 - 1524 ., 1 fig.
- F.A.O(2008) L'eau pour l'agriculture et l'énergie en Afrique: Les défis du changement climatique. Rapp. FAO. Libye, 13p
- Fourmigué, P. et Lavabre, J., (2005) Prédiction de crues avec le modèle conceptuel pluie-débit GR3H. Revue des Sciences de l'Eau 18(1), 87-102.
- Gaume, E., (2002) Eléments d'analyse des crues éclair, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 359 p.
- Gentil, L.(1903). Esquisse stratigraphique et pétrographique du bassin de la Tafna (Algérie). Serv. Carte géol. France. et Carte géol. Algérie. 521. p., 121fig. 5. pl ., 2 cartes géol
- Ghenim A., Seddini A., Terfous .A.(2003) Contribution à l ' évaluation de l ' impact sur l'environnement du barrage Sikkak (nord ouest Algérien). XXIII Rencontres universitaires de génie civil. Risques et environnement. p 1-7
- Ghenim, A., Seddini A. and Terfous, A., (2008). Contribution à l ' évaluation de l ' impact sur l'environnement du barrage Sikkak (nord ouest Algérien). XXIII Rencontres universitaires de génie civil. Risques et environnement. p 1-7
- Ghenim, A, Seddini, A, Terfous, A (2008) Variation temporelle de la dégradation spécifique du bassin versant de l'Oued Mouilah (nord-ouest algérien). Hydrol Sci J 2008, n°53, pp.448-56.
- Gottschalk L., Leblois E., Skøien J.O., (2011) Distance measures for hydrological data having a support, Journal of Hydrology, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.020, Volume: 402 Issue: 3-4 Pages: 415-421 Published: MAY 25 2011
- Guardia, P. (1975) Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord occidentale. Thèse .Doct. Nice. 256 p., 139 fig., 5 pl.
- Gupta, V., Waymire E., and Wang, T., (1980) Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. Water Resources research, 16:p. 855–862
- Habets, F., P. Etchevers, C. Golaz, E. Leblois, E. Ledoux, E. Martin, J. Noilhan et C. Ottlé, 1999. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin, Journal of Geophysical Research – Atmospheres, DOI: 10.1029/1999JD901008 , Vol 104, no D24, 31,145-31,172.
- Hayami S. (1951) On the propagation of flood waves, Disaster Prevention Res. Inst. Bul.1, Kyoto University, 1-16.
- Hingray, B., Picouet, C., Musy, A., (2009). Hydrologie 2. Une science de l'ingénieur .Houille Blanche (2), 113-121
- Hubert, P. (2002) Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. Hydro. Sci. 47(6), 921 -930.
- Humbert. J. and Kaden, U., 1994. Détection des modifications de l'écoulement fluvial au moyen de l'indice de débit de base. Rev Géographie alpine, 82(2). 25-36.
- Institute of Hydrology, 1980. Low flow studies. Res. Rep. 1. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 42p.
- Jakeman, A.J., Littlewood, I.G. et Whitehead, P.G., 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. Journal of Hydrology, 117: 275-300.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Juncker, P. (1971). Toward a global hydrological typology. *Journal of Hydrology (N.Z.)*, 10(2), 145-153.
- Kaabi (1994) Régionalisation Des Etiages Dans Le Nord Ouest De L'Algérie . Thèse .doc.Université Joseph Fourier, Grenoble.359p Ecole Doctorale de Mécanique
- Kabouya M. , Michel, C. (1991) Estimation des ressources en eau superficielle aux pas de temps mensuel et annuel, application à un pays semi-aride. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4(4), 569-587
- Kaci, M & Sassi, Y (2003) Population et développement en Algérie. C.I.P.D +10, Rapp. National, 96p
- Kettab. H (2001) les ressources en au en Algérie : Stratégies, enjeux et vision. Elseiver science BV., Desalination. Vol. 136, 1-3 , pp25-33.
- Khaldi. A (2005) Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida".Thèse.D'état. Univ . Mascara.Algériem 229p,
- Laborde, J.P., Mouhous N., (1998) Notice d'installation du logiciel HYDROLAB. Equipe de
- Lamb. L, Labiod. M (2009) Climate change and water availability in north-west Algeria. Investigation by stable water isotopes and dendochronology. *Water. Inter.* Vol. 34, n° 2, June 2009, pp.280-286.
- Lang, M. et Lavabre, J. (2007). Estimation de la crue centennale pour les plans de
- Latapie. A, (2011) Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application
- Leblois. E., 8 octobre 1993, De l'hydrologie avec le SIG raster IDRISI, 75 pages, rapport de stage de deuxième année l'ENGREF, Paris
- Leblois. E (2008) Hydrological processing of geographical information. Part one: Digital elevation models, Drainage pattern, Rivers, Basins. Notes de cours. University of Costa Rica & Cemagref-Lyon, France, 13p.
- L'hôte, Y., (1986) .Contrôle de la qualité et de l'homogénéité des données pluviométriques par la méthode du vecteur des indices annuels de précipitation. *Comptes rendus géographiques zurichoises.* no 23,15p
- Linsley, R.K., (1982). Rainfall-runoff models - An overview. In: Rainfall-runoff relationship, V. P. Singh (Ed.), Water Ressources Publications, 3-22.
- Lubès, H., Masson, M., J, Paturel, J. and Servat, E., (1998) Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité des chroniques. *Rev. Sci. Eau*, 3, 383-408.
- Makhlouf Z. et Michel C.(1994) A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology* 162, 299-318
- Mann, H. B. and Whitney, D. R., (1947) On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann. Math. Statist*, 18(1), 50-60.
- Mathevet, T., (2005) Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire? Développement empirique et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony), France, 463 pp.
- McDonnell, J.J., Mendiondo, E. M., O'Connell P. E., Oki T., Pomeroy J. W., Schertzer, D., Uhlenbrook ,S., and Zehe, E., (2003) IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 48, 857-880.
- Mebarki .A (2003) Cartographie automatique des précipitations:Application à l'Est de l'Algérie. *Rev. Sci. Technolgy.B-N°20*.Decembre(2003), 100-107.
- Meddi, M., Assani, A. and Meddi, H., (2010) Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management*, 24(14): 3817-3833.
- Meddi. H, Meddi.M, Mahr.N et Humbert.J., (2007) Quantification des précipitations : Application au Nord ouest de l'Algérie- la méthode Pluvia.Rev.Géographie Technica, n°1, 2007, p45-62.
- Meddi. M, Assani. A, Meddi. H., (2010) Temporal Variability of Annual Rainfall in the Macta and Tafna Catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management*, 24(14): 3817-3833
- Meddi. M, Hubert, P., (2003) Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-ouest de l'Algérie.Hydrology of Mediterranean and semiaridregions.IAHS.Pub. n°278, pp.1-7
- Megnounif, A., Terfous, A., Ghenaïm, A. and Poulet, J.B., (2004). Rôle des crues dans la production de sédiments transportés en suspension dans un cours d'eau des bassins versants méditerranéens. VIIIèmes Journées. Compiègne, 341-347
- Megnounif, A., Terfous, A., Ghenaïm, A. and Poulet, J.B., (2007). Key processes influencing erosion and sediment transport in a semi-arid Mediterranean area: the Upper Tafna catchment, Algeria. *Hydrol. Sci.*, 52 , 1271-84.
- Mekahli. L. (1988) Le Jurassique inférieur et moyen de la partie occidentale du Horst de Rhar Roubane (Tlemcen, Algérie occidentale) : Stratigraphie, sédimentologie et cadre dynamique. Thèse Magister. Univ. Oran. 260 p. 102 fig
- Meylan,P., Musy, A., (1999) Hydrologie Fréquentielle
Edit HGA, Bucarest, ISBN 973-98954-5-X., 415p.
- Michel, C., (1983) Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*, 1, 39-44. modèles conceptuels et "boîte noire"; test d'un modèle neuroflou *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 49(5) .
- Michel, C., (1989). *Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux*, Cemagref, Antony.
- Morell, M., Thébé.B., L'Hôte. Y. (1999) Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base. Edit. H.G.A,Bucarest., ISBN 973-98954-1-7. , 205p.
- Morin. G (1991) Le modèle hydrologique CEQUEAU : exemples d'application Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. AUPELF-UREE John Libbey Eurotext. Paris 0 1991, p. 23-39
- 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, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp
- Moussa, R., (1996) Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *Hydrological Processes*, 10: 1209-1227

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Musy, A. (1998). Hydrologie appliquée, Cours polycopié d'hydrologie générale, Lausanne, Suisse. H*G*A, Bucarest, Roumanie 368p.
- Nascimento, N.O., (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 p
- Nelder, J., et Mead, R., (1965) A simplex method for function minimization.
- Oliver, J. E., 1980. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 32(3), 300-309.
- Parajka, J., Merz, R., and Blöschl, G., (2005) A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9, 157-171.
- Peel, M. C., Chiew F. H. S., Western A. W., McMahon T. A., (2000) Extension of unimpaired monthly stream flow data and regionalisation of parameter values to estimate stream flow in ungaged catchment, *Appl. Hydrol.*, University of Melbourne, Parkville, Victoria, Australia.
- Perrin, C., (2002) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*(6/7), 84-91.
- Perrin, C., Andréassian, V., (2007) Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR) Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés.45p.
- Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V., (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279(1-4), 275-289
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V., (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, (279):p. 275-289. pluie-débit GR3H. *Revue des Sciences de l'Eau* 18(1), 87-102.
- Perrin, C.,(2000) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 pp.
- Pettitt, A., N., (1979) A non parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
- Pike, G.H., (1964) The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate. *J. Hydrol.* 2, 116-123.
- Post, D. A., and Jakeman, A. J., (1997) Relationships between catchment attributes and hydrological response characteristics in small Australian mountain ash catchments, *Hydrol. Proc.*, 10, 877-892., Proceedings of the HeadWater'98 Conference at Merano, Italy. IAHS ublication n° 248, pp. 297-305.
- Puget. J.L., Blanchet.R, Salençon. J et Carpentier. A (2010) le changement climatique. Institut de France.Rapp.Académie des sciences, 21p.
- R Development Core Team, (2004) R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Vienna, Austria. <http://www.r-project.org/>. Consulted on 2010/11/23.
- Rakotomalala, R., (2008) Comparaison des populations: Test non paramétriques. Cours. Univ. Lumière 2, Lyon, p 201.
- Rasmussen, P. F., Bobée, B. et Bernier, J., (1994) Une méthodologie générale de comparaison de modèles d'estimation régionale de crue. *Journal of Water Science*, vol. 7, n° 1, 1994, p. 23-41.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Renard, B., (2006) Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 364 pp.
- Renard, B., Lang, M., Bois, P., Dupeyrat, A., Mestre, O., Niel, H., Gailhard, J., Laurent, C., Neppel, L. and Sauquet, E., (2006) Evolution des extrêmes hydrométriques en France à partir de données observées. *La Houille Blanche - Revue Internationale de l'eau*, 6, 48-54.
- Rivard, C. J., Marion, Y., Michaud, S., Benhammane, A., Morin, R., Lefebvre and Rivera, A., (2003) Étude de l'impact potentiel des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine dans l'Est du Canada, Commission géologique du Canada, dossier public 1577, 39 p.
- Roche, P.A., (1988) Les modèles In: *Gestion des Eaux: Automatisation, Information et Télégestion*, F. Valiron (Ed.), Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, III, 138- 166.
- Rodriguez-Iturbe, I., and Valdès, J. (1979) The geomorphological structure of hydrologic response. *Water Resources research*, 15(6):p. 1409–1420.
- Rojas-Serna, C.R., (2005) Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie débit. Thèse doct. Ecole nationale . génie. Rur. 320p
- Sauquet E., L. Gottschalk et E. Leblois, (2000) Mapping average annual runoff: A hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme, article no 1642, *Hydrological Sciences Journal, Journal des Sciences hydrologiques*, DOI: 10.1080/02626660009492385, 45(6), 799-815
- Sauquet, E., (2009) Analyse spatiotemporelle des régimes hydrologiques de la Drôme et ses affluents. *Rapp. CEMAREF*. 46p.
- Sauquet, E., Ducharne, A., Habets, F., Martin, E., Oudin, L., Thiéry, D. and Viennot, P., (2009) Analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes. *Rapp.projet RexHySS*, 25p.
- Schott J.R. (1995) - Fault tolerant design using single and Multicriteria genetic algorithm optimization. Master's thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology.
- Seibert, J., (1999) Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model, *Agr. For. Met.*, 20 98–99, 279–293.
- Sherman, L. K., (1932). "Stream-flow from rainfall by the unit hydrograph method" *Eng. News Record* 108: 501-505
- Sicard, P., (2006) Caractérisation des retombées atmosphériques en France en zone rurale sous forme de précipitations, gaz et aérosols. Analyse des tendances spatio-temporelles et des séries chronologiques. Thèse. Doct. Univ; Lille, France, 425p.
- Sivapalan, M., Takeuchi ,K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri ,H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell ,J. J., Mendiondo, E. M., O'Connell ,P. E., Oki, T., Pomeroy, J. W., Schertzer ,D., Uhlenbrook, S. et Zehe, E. (2003) IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, vol 48, n° 6, 857-880

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

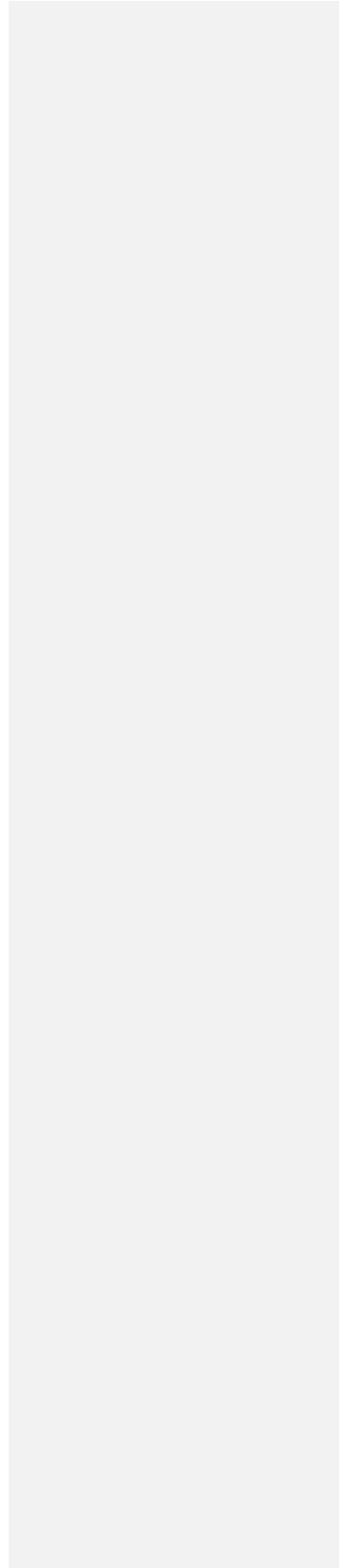
- Stedinger, J.R., Tasker, G.D., (1986). Regional hydrologic analysis 2. Model-error estimators, estimation of sigma and log-Pearson type 3 distributions. *Water Resour. Res.* 22 (10), 1487–1499.
- Strahler, A. N. (1952), "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology", *Geological Society of America Bulletin* 63 (11): 1117–1142
- Tallaksen, L., M. and Van Lanen, H., A., J., (2004) *Hydrological drought : processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Developments in water science* 48 Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 579p.
- Tidjani, A., E., B., Yebdri, D., Roth, J., C and Derriche, Z., (2009) Exploration des séries chronologiques d'analyse de la qualité des eaux de surface dans le bassin de la Tafna (Algérie). *Rev. Scie. Eau, Journal of Water Science*, 19(4), 315-324.
- Veldhuisen D.A.V., Lamont G.B. On measuring multi-objective evolutionary algorithm performance. D.A.V In Congress of evolutionary computation. Piscataway. New Jersey. Volume 1, 204-211, July 2000.
- Versiani, B., (1983) Modélisation de la relation pluie/débit pour la prévision de crues. PhD, INPG, Grenoble, France. 129p.
- Viramontes, D. and Descroix, L., 2000. Dégradation progressive du milieu par le surpâturage et le déboisement et conséquences hydrologiques. Etude de cas de la Sierra Madre occidentale (Mexique). *Rev. Géographie Alpine*, 2, 28-41
- Vrugt et al. (2003) - A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters
- Wilcoxon, F., (1945) Individual comparisons by ranking methods. *Bull. Biometrics*, 1(6), 80-83
- Wood, E., Lettenmaier, D., and Zartarian, V. (1992).
A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation model.
- Yapo P., Gupta H.V., Sorooshian S. (1996)- Calibration of conceptual rainfall - runoff models : sensitivity to calibration data. *Journal of hydrology*, 181, 23-48
- Yapo, P. O. H.V Gupta et S.Sorooshian (1998) Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models : sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology* 181, pp.23-48.
- Yebdri, D., Tidjani, A., Errih, M., Hamlat, M. (2007) Evaluation des ressources superficielles dans un hydrosystème complexe par l'utilisation du modèle SWAT: Application au bassin versant de la Tafna. *African Water Journal*. Vol.n°1, ISBN 92-1-125089-7, 47p.
- Yue, S. and Wang, C. Y., 2004. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management Journal*, 18, 201-218.
- Yue, S., Pilon, P. and Cavadias, G., 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259(1-4), 254-271.
- Zhang, Y.Q., et Chiew, F.H.S., (2009) Evaluation of regionalization methods for predicting runoff in ungauged catchments in southeast Australia. 18th world IMACS/ MODISM Congress, Cairns, Australia.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Zin.I (2002) Incertitudes et ambiguïté dans la modélisation hydrologique "Discussion, développements méthodologiques et application à l'hydrologie de crue en Ardèche".Ph.D.These. INPG.197p.,96 fig.
- Ziqi Yan, Lars Gottschalk, Etienne Leblois, Jun Xia, 2012 Joint mapping of water balance components in a large Chinese basin, Journal of Hydrology, in press
- Zizler E and Thiele L. (1998) - An evolutionary algorithm for multiobjective optimization: the strength Pareto approach. Technical report, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich).

ANNEXES

ANNEXES



Annexe_1 (Travaux avec HydroDem)

Nous présentons, ci-dessous, un état d'art des travaux ayant adopté Hydrodem comme support cartographique puis comme outil d'aide à la modélisation hydrologique.

- 1993 Leblois E., 8 octobre 1993, De l'hydrologie avec le SIG raster IDRISI, 75 pages, rapport de stage de deuxième année l'ENGREF, Paris
- 1999 Habets, F., P. Etchevers, C. Golaz, E. **Leblois**, E. Ledoux, E. Martin, J. Noilhan et C. Ottlé, 1999. Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, DOI: 10.1029/1999JD901008 , Vol 104, no D24, 31,145-31,172.
- 2000 Sauquet E., Krasovskaia Irina., **Leblois** Etienne, Usage de la décomposition en fonctions orthogonales empiriques pour la cartographie des régimes hydrologiques saisonniers, Mapping mean monthly runoff pattern using EOF analysis, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 4, no 1, pages 79-93, 2000
- 2000 Sauquet E., L. Gottschalk et E. **Leblois**, 2000. Mapping average annual runoff: A hierarchical approach applying a stochastic interpolation scheme, article no 1642, *Hydrological Sciences Journal*, Journal des Sciences hydrologiques, DOI: 10.1080/02626660009492385, 45(6), 799-815.
- 2001 Sauquet E., **Leblois** E. , 2001. Cartographie des écoulements annuels et mensuels moyens : une contribution au projet GEWEX-Rhône - Mapping runoff within the GEWEX-Rhone project *La Houille Blanche*, n°6-7, pages 120-129
- 2002 **Leblois** E., Svegårdén J., Building an ordered hydrographic network from non-structured vectorized hydrographic information to enhance drainage-patterns delineation in Nordic conditions, Poster, the Nordic Hydrology Conference, Roros, 2002
- 2003 Ducharne, A; Golaz, C; **Leblois**, E; Laval, K; Polcher, J; Ledoux, E; de Marsily, G , Development of a high resolution runoff routing model, calibration and application to assess runoff from the LMD GCM , *Journal of Hydrology*, 2003 , volume 280 , pages 207 - 228
- 2006 Gottschalk L., Krasovskaia I., **Leblois** E., Sauquet E., 2006, Mapping mean and variance of runoff in a river basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 10, pages 469-484
- 2006 Krasovskaia Irina, Gottschalk Lars ,**Leblois** Etienne, Pacheco Alexia, Regionalization of flow duration curves, Climate Variability and Change – Hydrological Impacts – Proceedings of the fifth FRIEND World conference held at Havana, Cuba, November 2006, IAHS Publ. 308, 2006, pages 105-110
- 2006 Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I., **Leblois** E., Predicting river flow statistics at ungauged locations—a hydrostochastic approach , in : Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parametization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX (Proceedings of the Paris (2004) and Foz de Iguacu (2005) workshops). IAHS Publ. 307, 2006.

ANNEXES

- 2006 Gomez Federico, Krasovskaia Irina, Gottschalk Lars, **Leblois** Etienne, Interpolation of water balance components for Costa-Rica, Climate Variability and Change – Hydrological Impacts – Proceedings of the fifth FRIEND World conference held at Havana, Cuba, November 2006, IAHS Publ. 308, 2006, pages 614-645
- 2008 **Leblois** E. Hydro-Logical processing of geographical information ; part one : DEM, Drainage pattern, Rivers, Basins, 44 pages ; part two : Hydrodem Quick reference, 12 pages. Notes de cours du Master d'hydrologie commun de l'université d'Oslo et de l'université du Costa-Rica
- 2008 Habets F.; Boone A.; Champeaux J. L. et 10 autres co-auteurs dont **Leblois** E., The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, Volume: 113 Issue: d6 (2008-01-01) ISSN: 0148-0227 DOI: 10.1029/2007JD008548 Published: MAR 29 2008
- 2010 Habets F., Gascoïn, S., Korkmaz, S., Thiéry, D., Zribi, M., Amraoui, N., Carli, M., Ducharne, A., **Leblois**, E., Ledoux, E., Martin, E., Noilhan, J., Ottlé, C. and Viennot, P. (2010). "Multi-model comparison of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France) , *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 99-117
- 2011 Gottschalk L., **Leblois** E., Skøien J.O. Correlation and covariance of runoff revisited, *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.hydro.2010.12.011, Volume: 398 Issue: 1-2 Pages: 76-90, Published: FEB 15 2011
- 2011 Gottschalk L., **Leblois** E., Skøien J.O., Distance measures for hydrological data having a support, *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydro.2011.03.020, Volume: 402 Issue: 3-4 Pages: 415-421 Published: MAY 25 2011
- 2012 Thierion C. et 10 coauteurs dont **Leblois** E. , Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem, *Journal of Hydrology*, 424-425 (2012), 68-83 doi:10.1016/j.jhydro.2011.12.028
- 2012 Ziqi Yan, Lars Gottschalk, Etienne **Leblois**, Jun Xia, Joint mapping of water balance components in a large Chinese basin, *Journal of Hydrology*, in press

Annexe 2 (Principe de l'adaptation de GR4 aux besoins de la simulation semi-distribuée)

Ici se trouve le code originel de GR4J (en Fortran), dans lequel ont été reportées les principales modifications effectuées en vue d'en faire un modèle de bilan hydrique. On voit qu'il s'agit essentiellement de suivre le bilan hydrique et d'explicitier les termes laissés implicites par la version de référence.

Cette restitution n'est qu'indicative, dans la mesure où le travail effectif a été effectué sur une transcription en Pascal du code GR4J et que le présent code fortran n'a pas été validé. Ne pas utiliser ceci en production.

////////////////////////////////////
GR4J

Constants :

- * NPX : Number of optimised parameters (set to 4)
- * NH : Maximum number of ordinates in UH1 (set to 7 but can be chosen larger in case of large catchments)

Input-output variables :

- * P : Raw rainfall (mm)
- * E : Potential evapotranspiration (mm)
- * Q : Streamflow (mm)

Model state variables :

- * V(1) : level in the production store (mm)
- * V(2) : level in the routing store (mm)
- * V(3) to V(2+NH) : levels in the stores corresponding to unit hydrographs UH1 (mm)
- * V(3+NH) to V(2+3.NH) : levels in the stores corresponding to unit hydrographs UH2 (mm)

Parameters :

- * X(1) : maximum capacity of the production store (mm)
- * X(2) : water exchange coefficient (mm)
- * X(3) : one day ahead maximum capacity of the routing store (mm)
- * X(4) : time base of unit hydrograph UH1 (days)

Ordinates of unit hydrographs :

- * X(NPX+1) to X(NPX+NH) : ordinates of unit hydrograph UH1 (-)
- * X(NPX+NH+1) to X(NPX+3.NH) : ordinates of unit hydrograph UH2 (-)

C Raison : explicitation par variables retour de l'Etr et des échanges entrant ou sortant

Annexe _3 (simplex method)

John Nelder et Roger Mead, « A simplex method for function minimization », dans *Computer Journal*, vol. 7, n° 4, 1965, p. 308-313

Algorithme du simplexe dit aussi « downhill simplex method » de Nelder et Mead (1965)

La méthode de Nelder-Mead est un algorithme d'optimisation non-linéaire. C'est une méthode numérique qui cherche à minimiser une fonction continue dans un espace à plusieurs dimensions. L'algorithme exploite le concept de simplexe de N+1 sommets dans un espace à N dimensions. Au cours des itérations, le modèle subit des déformations et se réduit progressivement jusqu'à ce que ses sommets se rapprochent d'un point où la fonction est localement minimale.

Algorithme

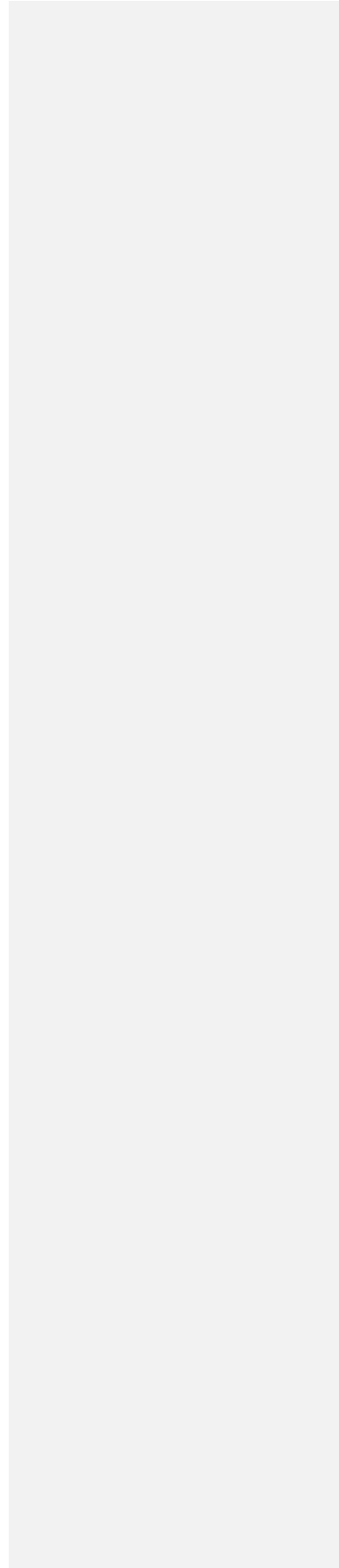
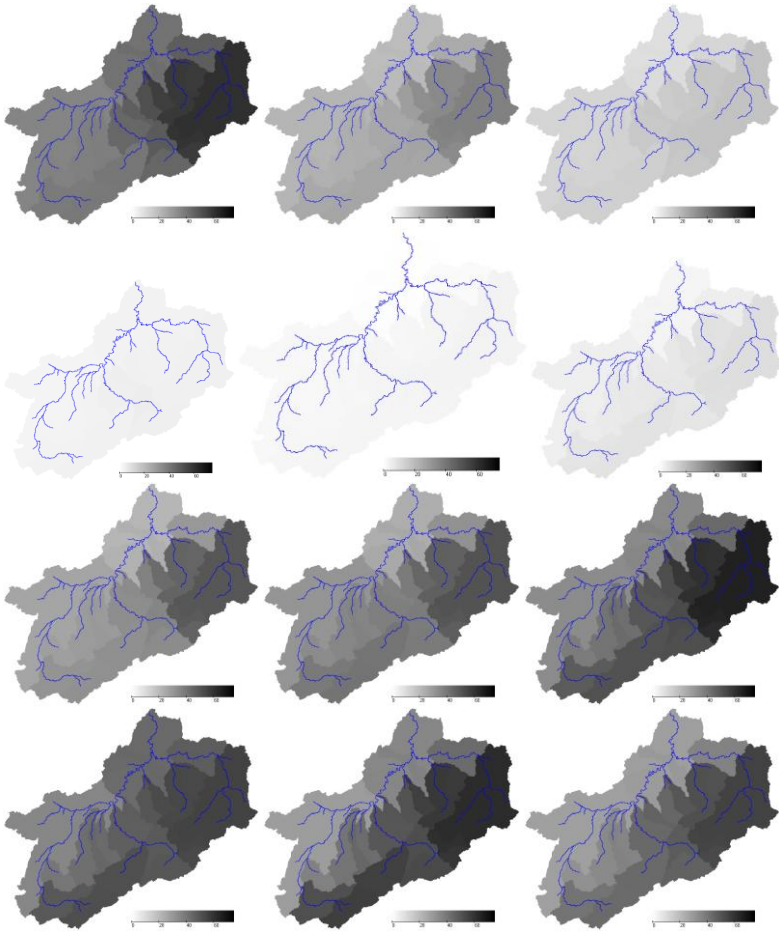
Soit N la dimension de l'espace où f prend ses valeurs. L'algorithme débute par la définition d'un simplexe non dégénéré choisi dans cet espace. Par itérations successives, le processus consiste à déterminer le point du simplexe où la fonction est maximale afin de le substituer par la réflexion de ce point par rapport au centre de gravité des N points restants. Si la valeur de la fonction en ce nouveau point est inférieure aux valeurs prises sur les autres points, le simplexe est étiré dans cette direction. Sinon, il est supposé que l'allure locale de la fonction est une vallée, et le simplexe est réduit par une similitude centrée sur le point du simplexe où la fonction est minimale.

Plus précisément :

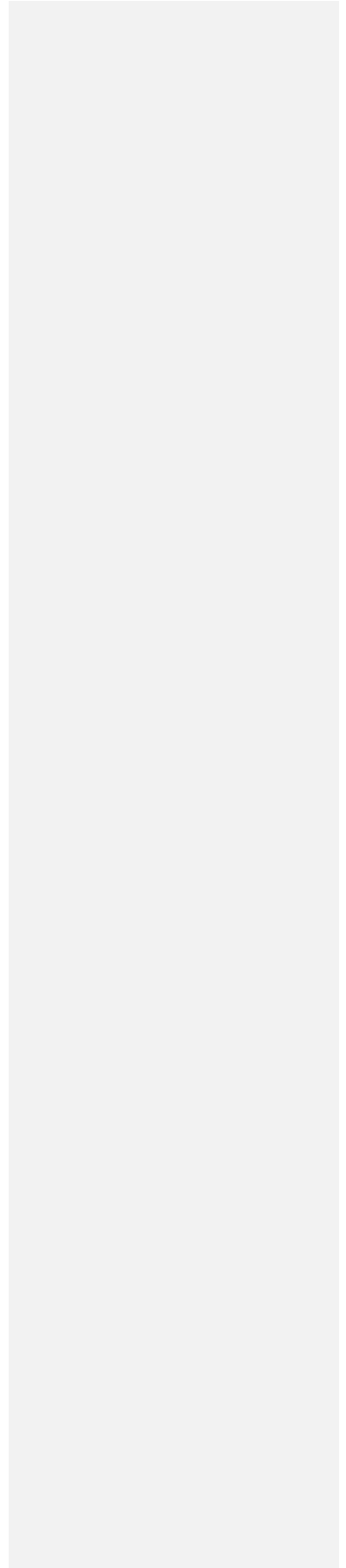
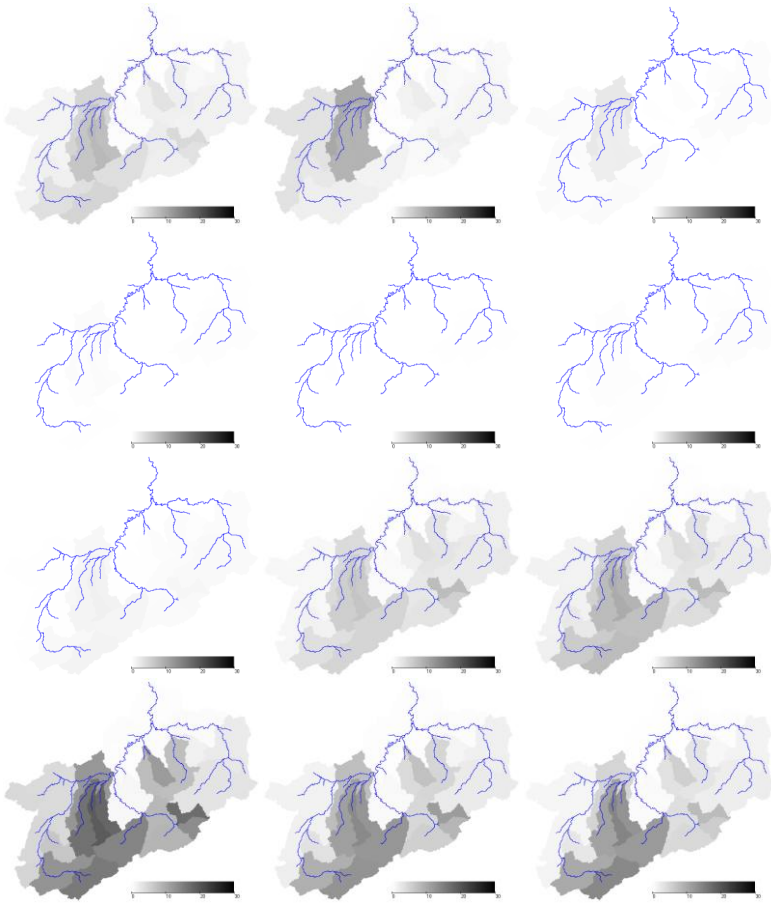
1. Choix de N+1 points de l'espace à N dimensions des inconnues, formant un simplexe : $\{x_1, x_2, \dots, x_{N+1}\}$,
2. Calcul des valeurs de la fonction f en ces points, réindexation des points de façon à avoir $f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{N+1})$. Il suffit en fait de connaître le premier et les deux derniers.
3. Calcul de x_0 , centre de gravité de tous les points sauf x_{N+1} .
4. Calcul de $x_r = x_0 + (x_0 - x_{N+1})$ (réflexion de x_{N+1} par rapport à x_0).
5. Si $f(x_r) < f(x_N)$, calcul de $x_e = x_0 + 2(x_0 - x_{N+1})$ (étirement du simplexe). Si $f(x_e) < f(x_r)$, remplacement de x_{N+1} par x_e , sinon, remplacement de x_{N+1} par x_r . Retour à l'étape 2.
6. Si $f(x_N) < f(x_r)$, calcul de $x_c = x_{N+1} + 1/2(x_0 - x_{N+1})$ (contraction du simplexe). Si $f(x_c) \leq f(x_N)$, remplacement de x_{N+1} par x_c et retour à l'étape 2, sinon aller à l'étape 7.
7. Similitude de rapport 1/2 et de centre x_1 : remplacement de x_i par $x_1 + 1/2(x_i - x_1)$ pour $i \geq 2$. Retour à l'étape 2.

ANNEXES

Annexe_4 (REGIME MENSUEL DES PLUIES/DEBITS)

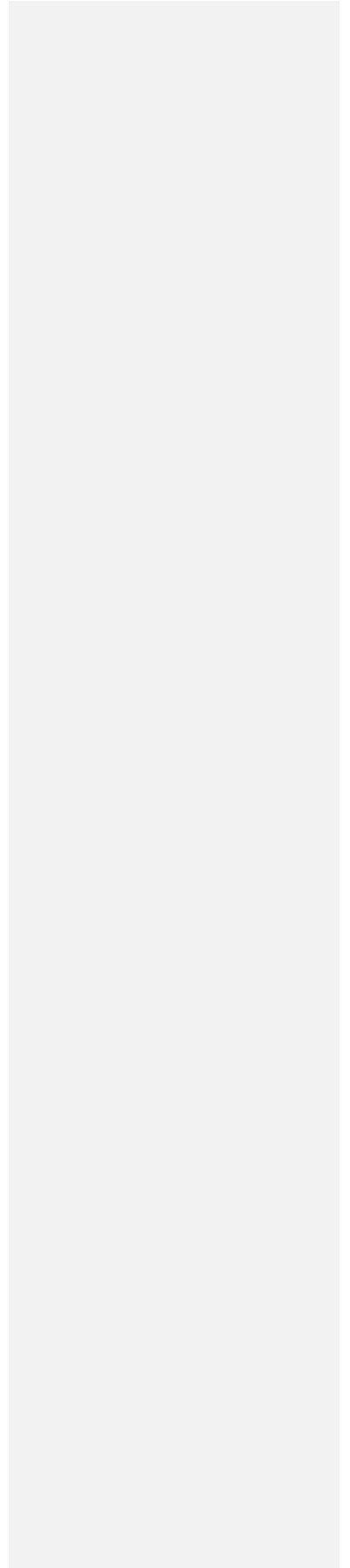


REGIME MENSUEL DES DEBITS



ANNEXES

Annexe_5 (Publication)



ANNEXES

