



LABORATOIRE
de MÉCANIQUE
de LILLE
UMR CNRS 8107



Thèse en cotutelle

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

&

UNIVERSITE IBNOU ZOHR D'AGADIR

Préparée au Laboratoire de Mécanique de Lille
Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE EN GENIE CIVIL

Spécialité :

HYDROLOGIE DE SURFACE

TYPOLOGIE ET ANALYSE HYDROLOGIQUE DES EAUX SUPERFICIELLES A PARTIR DE QUELQUES BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS DU MAROC

Par
M^{lle} Souad RIAD

Directeurs de thèse :

M^r Jacky **MANIA**, Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille
M^r Lhoussaine **BOUCHAOU**, Professeur à la faculté des sciences d'Agadir

Soutenue le 12/12 /2003 à 14h devant la commission d'examen :

Rapporteurs :

M^r Y. **NAJJAR**, Professeur, Université de l'Etat de Kansas (USA)
M^r M. **RAZACK**, Professeur, Université de Poitiers
M^r A. **MANGIN**, Directeur de CNRS, Laboratoire Souterrain de Moulis
M^r Y. **HSISSOU**, Professeur à la faculté des sciences d'Agadir

Examineurs :

M^r E. **CARLIER**, Professeur, Université d'Artois
M^r I. **SHAHROUR**, Professeur, Ecole Polytechnique Universitaire de Lille

A la mémoire de mon **père**

A ma très chère **mère** : Sans elle rien n'aurais pu être fait

A mes frères : Mustapha, Hamid, Laalami et Khalid

A mes sœurs : Rabiaa et Hakima

A mon beau frère Mohammed RIAD

A ma belle sœur Fatima BENHNINI

A toute la famille RIAD

A toute la famille CHAKIRY

A tous mes amis.

A mes neveux et mes nièces : Meryam, Yassir, Raja, Najoua, Mourad, Kawtar et M'Barek

Et c'est à ma mère que je dédie ce travail

AVANT-PROPOS

Ce travail de recherche a été réalisé au Laboratoire de Mécanique de Lille (LML), département de Géotechnique & Génie Civil (GTGC) à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille (EPUL), Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), dans le cadre d'une thèse en cotutelle avec l'Université Ibnou Zohr d'Agadir au Maroc.

Au terme de cette recherche, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce sujet de thèse.

En premier lieu, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mes deux directeurs de thèse, Jacky MANIA, Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, Université des Sciences et Technologies de Lille, et Lhoussaine BOUCHAOU, Professeur à la Faculté des Sciences, Université Ibnou Zohr à Agadir.

*Mr le Professeur **J. MANIA** m'a accueilli dans son laboratoire, m'a réservé des moments précieux de discussion et m'a facilité toutes les conditions pour mener ce travail à bien. Je le remercie infiniment pour son apport à la grande cohérence de ce manuscrit, sa disponibilité et sa sympathie.*

*Mr le Professeur **L. BOUCHAOU**, pour tous ces conseils et ses encouragements qu'il m'a prodigués et qui m'a aidé le plus possible que ce soit durant son séjour à Lille ou soit durant mes séjours à Agadir. Je le remercie très sincèrement pour sa sympathie, ses remarques et ses discussions les plus intéressantes.*

*Mr **I. SHAHROUR**, Professeur à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille a bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse et d'examiner ce travail de recherche. Je lui exprime mes très vifs remerciements et mon profond respect.*

*Mr le Professeur **Y. NAJJAR** de l'Université de Kansas, a bien voulu être rapporteur de ma thèse. Je le remercie vivement pour tous les discussions, suggestions et ces précieux conseils durant tous ses séjours à Lille. Je lui exprime ma profonde reconnaissance.*

*Mr M. **RAZACK**, Professeur à l'Université de Poitiers qui a accepté d'être un rapporteur de mon travail. Je le remercie vivement.*

*Mr E. **CARLIER**, Professeur à l'Université d'Artois pour avoir bien voulu participer à mon jury et juger ce travail. Je lui exprime ma profonde reconnaissance.*

*Je remercie également Mr **A. MANGIN**, Directeur de recherche au CNRS et toute son équipe pour son accueil chaleureux durant mon séjour de stage au laboratoire souterrain de Moulis et pour avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse.*

*Je remercie également Mr **Y. HSISSOU**, Professeur à la faculté des sciences d'Agadir pour avoir accepté de rapporter ce travail de recherche. Je le remercie vivement pour ces nombreux conseils et discussions durant mes séjours à Agadir.*

*J'adresse mes très chaleureux remerciements en particulier à **mon frère Hamid** pour son soutien moral et matériel durant toutes ces années de thèse. Il m'a permis d'envisager tous les obstacles, de me soutenir dans les moments de découragement et de faire avancer mon travail en toute sérénité.*

Mes remerciements s'adressent également aux professeurs L. BENABIDATE, N. KHALIL, A. EL ACHHEB, A. EL YOUNSSI, A. HANI et L. DJABRI, pour leur conseils et discussions durant leurs séjours au laboratoire, Département de Géotechnique et Génie Civil à L'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille.

Je n'oublierai pas de remercier Mr Said JALALA, Mr Khamis ALMAHALLAWI, Mr Mohammed EILA et Mr Issa MUSA du ministère de l'environnement à Palestine pour leur sincère amitié et leur sympathie durant leur séjour à Lille. Je leur souhaite bonne continuation et bon courage pour leurs thèses de Doctorat.

Je remercie également tout le personnel de la Direction Générale d'Hydraulique (DRH) de Rabat qui nous a fourni les données des différents bassins qui ont fait objet de cette recherche et Mr MM. SAIDI, professeur à la faculté des sciences et techniques de Marrakech qui m'a fourni les données de la région du Haut Atlas de Marrakech.

Je n'oublie pas dans ces remerciements tous mes amis de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, pour leur ambiance agréable dans laquelle s'est déroulé ce travail, leur sympathie et leur soutien durant toutes ces années de recherche. Je cite Naima, Amina, Rabiaa, Latifa, Samira, Said, Khalid, Lina, Nourreddine, Adil, Rochdi, Karim, Jalal, Hassan, Rachid, Driss, Hicham, Redouane, Abdelilah, Azzedine, Abdrezzak, Sami, Lahcen, Jamal, Ahmed, Hafid, Frédéric, Zoubair, Wadie, Mohamed, Raed, Ihssane, Hani, Eddy, Rami, Ali, Brahim et Bassem. Qu'ils, je leur remercie très sincèrement.

Un grand merci aux personnels de l'atelier de reprographie et du service informatique de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Lille, plus particulièrement : Serge DUPONT, Bernard DERACHE, Alain LORGUEZ, Dominique GOLPART, Dominique FRANÇOIS, Patrick MENAGER et Juliette LOISELEUX.

Ce que je dois à ma chère mère va bien au delà des remerciements ou même de la gratitude. Mon vocabulaire est trop limité pour exprimer son importance dans ce travail et dans ma vie. Elle le sait.

Je dédie enfin ce manuscrit à tous les membres de ma famille qui m'ont toujours aidé, encouragé et soutenu durant toutes ces longues années de recherche jusqu'au l'achèvement de ce travail, et plus précisément je cite : Aicha, Fatiha, Mbarka, Saadia, Sabah, Meryem, Said, Zohra, Abdel Alwahed, Samira, Farida, Fatima, Najib, Khadija, Tibari, Amina, Naima, Aicha, Brahim, Bahija, Tarik, Jilali et Abdelatif.

Je remercie profondément toute ma famille. Ces études auxquelles je mets un terme, c'est avant tout à eux que je les dois, à eux qui, depuis toujours et en particulier tout au long de ces dernières années ont su partager avec patience et amour mes instants de joies.

Je remercie enfin toutes les personnes intéressées par mon travail, en espérant qu'elles puissent trouver dans mon rapport de thèse des explications utiles.

Merci encore à tous.

TABLE DE MATIERES

AVANT-PROPOS	3
TABLE DE MATIERES	6
INTRODUCTION GENERALE	11
1) Problématique de ce travail	13
2) Contexte climatique	14
3) Ressources en eau	16
4) Problématique des ressources en eau au Maroc	18
5) Objectifs de la recherche	19
6) Présentation du Manuscrit	20
 1^{ère} PARTIE : CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES PHYSIOGRAPHIQUES & GEOLOGIQUES DES BASSINS ETUDIES	
I. SITUATION GEOGRAPHIQUE	24
I.1. Bassin versant de la Moulouya	25
I.2. Bassins Côtiers Méditerranéens	26
I.3. Bassin versant de Tensift	26
I.4. Bassins versants de Ziz-Rhéris et Guir	27
II. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES	29
II.1. Superficie	29
II.2. Périmètre	30
II.3. Indice de compacité de Gravelius	30
II.4. Rectangle équivalent	30
II.5. Longueur du cours d'eau principal	31
II.6. Pente moyenne	31
II.7. Densité de drainage	32
II.8. Altitude de la station hydrométrique	33
II.9. Impact sur les pluies et le ruissellement	34
III. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES	34
III.1. Bassin versant de la Moulouya	35
III.1.1. Le Paléozoïque	35
III.1.2. Le Trias	35
III.1.3. Le Jurassique	35
III.1.4. Le Crétacé	35
III.1.5. Le Tertiaire	35
III.1.6. Le Quaternaire	36
III.2. Bassins Côtiers Méditerranéens	37
III.3. Bassin versant de Tensift	38
III.3.1. Le Haut Atlas	38
III.3.2. Les Jbilet et Mouissates	38
III.3.3. Le plateau des Mouissates	38
III.3.4. Le bassin d'Essaouira-Chichaoua	38
III.3.5. La plaine de Haouz	38
III.4. Bassins versants de Ziz-Rhéris et Guir	39
III.4.1. Le Paléozoïque	39
III.4.2. Le Trias	39

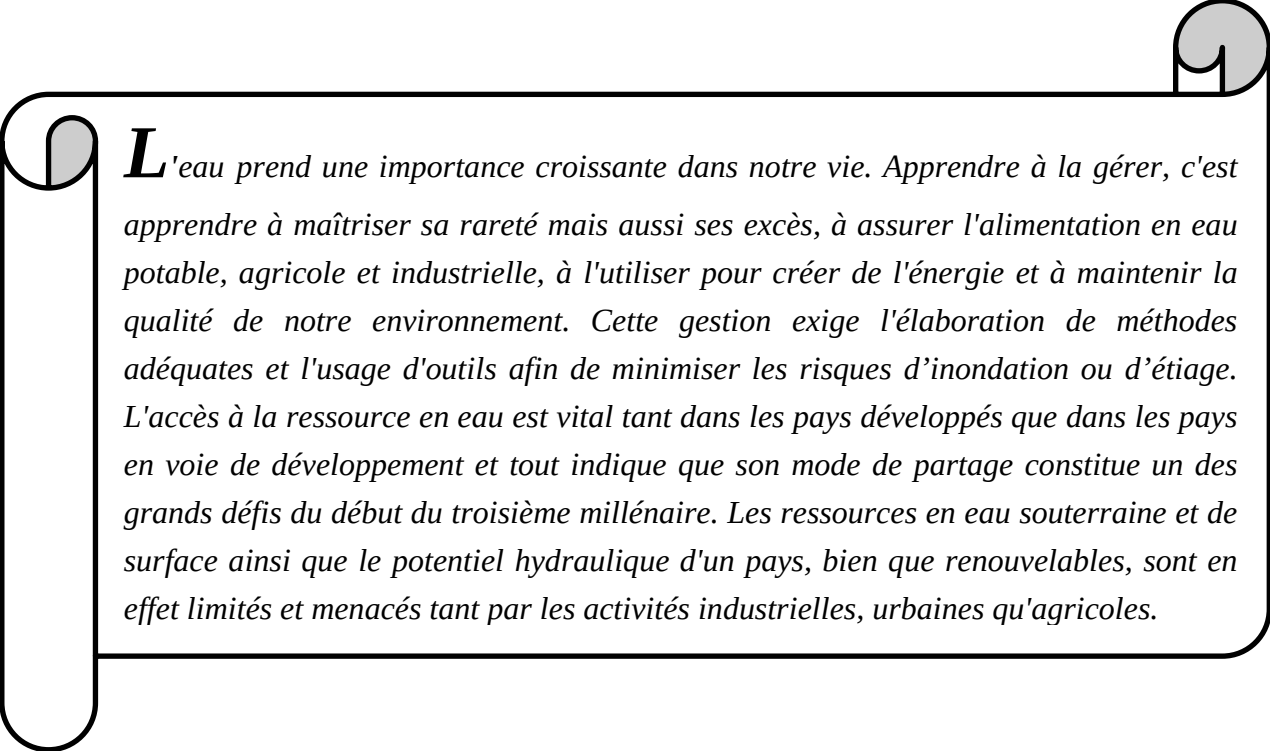
III.4.3. Le Jurassique.....	39
III.4.4. Le Crétacé.....	39
III.4.5. Le Tertiaire.....	39
III.4.6. Le Quaternaire.....	39
III.5. Impact de la géologie sur l'hydrologie.....	41
IV. CLIMATOLOGIE GENERALE.....	42
IV.1. Bassin versant de la Moulouya.....	42
IV.2. Bassins Côtiers Méditerranéens.....	42
IV.3. Bassin versant de Tensift.....	42
IV.4. Bassins versants de Ziz-Rhéis et Guir.....	43
IV.5. Impact de la climatologie sur l'hydrologie.....	44
V. CONCLUSION.....	44
 2^{ème} PARTIE : TRAITEMENT DES DONNEES PHYSIOGRAPHIQUES & HYDROPLUVIOMETRIQUES	
I. AQUISITION DES DONNEES	46
I.1. Données physiographiques.....	46
I.2. Données pluviométriques.....	46
I.2.1. Situation des postes pluviométriques.....	46
I.2.2. Caractéristiques des postes pluviométriques.....	46
I.3. Données hydrométriques.....	47
I.3.1. Situation des stations hydrométriques.....	47
I.3.2. Caractéristiques des stations hydrométriques.....	47
II. CRITIQUE DES DONNEES	48
III. TRAITEMENT DES DONNEES.....	49
III.1. Analyse statistique des données physiographiques.....	49
III.1.1. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	49
III.1.1.1. Introduction.....	49
III.1.1.2. Application de l'ACP	50
III.1.2. Analyse Factorielle Discriminante (AFD).....	53
III.1.2.1. Rappel.....	53
III.1.2.2. Application de la méthode.....	53
III.1.3. Modèle de Régression Linéaire Multiple (RLM).....	55
III.2. Analyse statistique des données pluviométriques.....	57
III.2.1. Pluies moyennes mensuelles.....	57
III.2.1.1. Bassin versant de la Moulouya.....	57
➤ Oued Ansegmir à la station d'Ansegmir.....	57
III.2.1.2. Bassin versant de Tensift.....	57
➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou.....	57
III.2.1.3. Bassins versants de Ziz-Rhéis.....	57
➤ Oued Sidi Hamza à la station de Foum Tilicht.....	57
➤ Oued Todrha à la station d'Ait Boujjane.....	57
III.2.2. Pluies moyennes annuelles et interannuelles.....	58
III.2.2.1. Bassin versant de la Moulouya.....	58
➤ Oued Ansegmir à la station d'Ansegmir.....	58

III.2.2.2. Bassin versant de Tensift.....	58
➤ Oued Ourika à la station d' <i>Aghbalou</i>	58
III.2.2.3. Bassins versants de Ziz-Rhéis.....	59
➤ Oued Sidi Hamza à la station de <i>Foum Tilicht</i>	59
➤ Oued Todrha à la station d' <i>Ait Bouijane</i>	59
III.3. Analyse statistique des données hydrométriques.....	60
III.3.1. Evolution des débits moyens mensuels.....	60
III.3.1.1. Bassin versant de la Moulouya.....	60
➤ Oued Ansegmir à la station d' <i>Ansegmir</i>	60
III.3.1.2. Bassin versant de Tensift.....	61
➤ Oued Ourika à la station d' <i>Aghbalou</i>	61
III.3.1.3. Bassins versants de Ziz-Rhéis.....	61
➤ Oued Sidi Hamza à la station de <i>Foum Tilicht</i>	61
➤ Oued Todrha à la station d' <i>Ait Bouijane</i>	61
III.3.2. Variation des débits moyens annuels et interannuels	62
III.3.2.1. Bassin versant de la Moulouya.....	62
➤ Oued Ansegmir à la station d' <i>Ansegmir</i>	62
III.3.2.2. Bassin versant de Tensift.....	62
➤ Oued Ourika à la station d' <i>Aghbalou</i>	62
III.3.2.3. Bassins versants de Ziz-Rhéis.....	63
➤ Oued Sidi Hamza à la station de <i>Foum Tilicht</i>	63
➤ Oued Todrha à la station d' <i>Ait Bouijane</i>	63
III.3.3. Analyse statistique des débits extrêmes	64
III.3.3.1. Introduction.....	64
III.3.3.2. Résultats des ajustements statistiques.....	65
III.3.3.2.1. Bassin versant de la Moulouya.....	65
➤ Oued Ansegmir à la station d' <i>Ansegmir</i>	65
III.3.3.2.2. Bassin versant de Tensift.....	65
➤ Oued Ourika à la station d' <i>Aghbalou</i>	65
III.3.3.2.3. Bassin versant de Ziz-Rhéis.....	66
➤ Oued Sidi Hamza à la station de <i>Foum Tilicht</i>	66
➤ Oued Todrha à la station d' <i>Ait Bouijane</i>	66
III.4. Analyse corrélatrice et spectrale (ACS).....	67
III.4.1. Introduction.....	67
III.4.2. Principe de la méthode.....	68
III.4.2.1. Analyse simple.....	68
a) <i>Corrélogramme simple</i>	68
b) <i>Spectre simple</i>	70
III.4.2.2. Analyse croisée.....	72
a) <i>Corrélogramme croisé</i>	72
b) <i>Spectre croisé</i>	73
c) <i>Fonction de cohérence</i>	75
d) <i>Fonction de gain</i>	75
III.4.3. Application à des bassins versants pilotes représentatifs	76
III.4.3.1. Bassin versant de la Moulouya	76
➤ Oued Ansegmir à la station d' <i>Ansegmir</i>	76
a) Analyse du signal d'entrée (Pluies).....	76
b) Analyse du signal de sortie (Débits).....	77
c) Analyse croisée.....	78
• Fonctions d'amplitude et de gain.....	79

III.4.3.2. Bassin versant de Tensift.....	79
➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou	79
a) Analyse du signal d'entrée (Pluies).....	79
b) Analyse du signal de sortie (Débits).....	80
c) Analyse croisée.....	81
• Fonctions d'amplitude et de gain.....	82
III.4.3.3. Bassin versant de Ziz-Rhéis.....	82
➤ Oued Sidi Hamza à la station de Fout Tiliht.....	82
a) Analyse du signal d'entrée (Pluies).....	82
b) Analyse du signal de sortie (Débits).....	83
c) Analyse croisée.....	84
• Fonctions d'amplitude et de gain.....	85
➤ Oued Todhra à la station d'Ait Boujjane.....	85
a) Analyse du signal d'entrée (Pluies).....	85
b) Analyse du signal de sortie (Débits).....	86
c) Analyse croisée.....	87
• Fonctions d'amplitude et de gain.....	88
III.4.4. Conclusion.....	89
IV. CONCLUSION.....	90
 3^{ème} PARTIE : MODELISATION DES FONCTIONS PLUIE-DEBIT	
I. RAPPEL DES MODELES HYDROLOGIQUES.....	92
I.1. Introduction.....	92
I.2. Modèles conceptuels (ou déterministes).....	92
I.3. Modèles globaux (ou stochastiques).....	93
II. MODELE MERO MMO8.....	93
II.1. Introduction.....	93
II.2. Principe du modèle Mero MMO8.....	94
II.3. Fonctionnement du modèle.....	95
II.4. Résultats de la simulation.....	97
III. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS (RNA).....	99
III.1. Présentation de la méthode neuronale.....	99
III.2. Connections entre les neurones.....	99
III.3. Perceptron Multicouche (PMC).....	100
IV. APPLICATION DU MODELE DE RNA.....	101
IV.1. Architecture du réseau.....	102
IV.2. Collecte des données.....	104
IV.3. Critères de performance du modèle.....	104
IV.4. Résultats et discussions.....	105
IV.4.1. Sélection des entrées du réseau.....	105
IV.4.2. Prévision des débits.....	109
IV.4.3. Comparaison avec le modèle de Régression Linéaire Multiple (RLM).....	113
IV.4.3. Comparaison avec le bassin versant de l'oued Ansegmir.....	118
IV.5. Conclusion.....	120

V. CONCLUSION	120
CONCLUSION GENERALE	123
BIBLIOGRAPHIE	128
LISTE DES FIGURES	141
LISTE DES TABLEAUX	145
ANNEXES	147

L'eau étant une ressource naturelle essentielle à la vie, les utilisateurs doivent être redevables quant à son utilisation ou à sa détérioration.



L'eau prend une importance croissante dans notre vie. Apprendre à la gérer, c'est apprendre à maîtriser sa rareté mais aussi ses excès, à assurer l'alimentation en eau potable, agricole et industrielle, à l'utiliser pour créer de l'énergie et à maintenir la qualité de notre environnement. Cette gestion exige l'élaboration de méthodes adéquates et l'usage d'outils afin de minimiser les risques d'inondation ou d'étiage. L'accès à la ressource en eau est vital tant dans les pays développés que dans les pays en voie de développement et tout indique que son mode de partage constitue un des grands défis du début du troisième millénaire. Les ressources en eau souterraine et de surface ainsi que le potentiel hydraulique d'un pays, bien que renouvelables, sont en effet limités et menacés tant par les activités industrielles, urbaines qu'agricoles.

INTRODUCTION GENERALE

1) Problématique de ce travail

L'eau, une des plus importantes ressources naturelles, doit être protégée de manière à garantir de façon durable son équilibre entre les besoins et les utilisations.

Le développement durable des activités humaines s'appuie, en particulier, sur une gestion intégrée des eaux. Une gestion efficace et durable des eaux ne se limite pas à garantir, en moyenne, une quantité et une qualité suffisantes pour les demandes humaines (eau potable, industrielle, d'irrigation,...) et pour les besoins des milieux naturels ; elle doit aussi prendre en compte la manifestation des événements extrêmes, tels que les étiages et les crues.

La quantité et la qualité des ressources en eau disponibles posent des problèmes de plus en plus complexes et difficiles à résoudre. La consommation d'eau augmente considérablement et la pénurie se fait sentir dans de nombreux pays en voie de développement. Une gestion intégrée des ressources en eau s'impose donc pour accompagner un développement durable qui puisse concilier le développement socio-économique et la préservation de l'environnement.

A l'instar des pays de la rive Sud du bassin méditerranéen, le Maroc, pays à climat essentiellement semi-aride à aride dans la majeure partie de son territoire, est confronté au problème du développement et de la gestion durable de ses ressources en eau. En effet, bien que disposant d'importantes chaînes de montagnes, d'une large ouverture maritime et par une grande disparité géographique, ces ressources en eau sont limitées vis à vis d'une forte demande qui résulte de la croissance démographique, de l'amélioration des conditions de vie, du développement des différentes industries et de l'extension de l'irrigation.

Devant ces contraintes, le Maroc a fourni, depuis les années soixante, d'importants efforts de mobilisation de son potentiel hydraulique pour faire face à l'accroissement démographique et assurer son développement socio-économique. Cependant, le potentiel hydraulique limité nécessite, parallèlement à la poursuite de l'effort de mobilisation, une maîtrise des phénomènes hydrologiques extrêmes (crues et sécheresses) par l'établissement des plans directeurs de développement des ressources en eau à l'échelle des bassins versants, d'adopter une stratégie de gestion de la demande en eau afin de satisfaire les besoins en eau et d'assurer les conditions d'une utilisation bénéfique de ces ressources hydriques, d'améliorer les performances des infrastructures (barrages, ouvrages de transfert d'eau, forages).

Dans le cadre de ce travail, on s'est intéressé à l'analyse hydrologique des eaux superficielles de quelques bassins versants situés sous climat semi-aride du Maroc, en conditions normales ainsi qu'en période de crise liée aux événements extrêmes suite à la fameuse crue de l'oued Ourika, survenue le 17 Août 1995 dans la région du Haut Atlas de Marrakech. Ces crues exceptionnelles ont provoqué en un

temps record des pertes humaines et des dégâts matériels. D'où la nécessité d'établir des systèmes performants de prévention et d'évacuation rapide de la population par installation d'infrastructures appropriées et de système d'alerte en cas de prévision de phénomènes catastrophiques naturels. Il en résulte une amélioration significative sur le plan socio-économique des zones à risque.

2) Contexte climatique

Soumis aux influences méditerranéennes au Nord, océaniques à l'Ouest, continentales, puis sahariennes de plus en plus vers l'Est et le Sud, le climat du Maroc est principalement caractérisé par un été chaud et sec où les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte et un hiver frais, parfois froid. Ces influences marquent sévèrement le climat ; pluviométrie aléatoire, sécheresses fréquentes et imprévisibles, régime hydrique instable...autant d'éléments qui se répercutent sur la vie économique et sociale du pays.

La présence d'une chaîne de montagnes traversant la quasi totalité de la région d'Ouest en Est, conjuguée à des caractéristiques géologiques et géomorphologiques très diversifiées font que les ressources en eau superficielles et souterraines sont réparties entre de nombreux systèmes hydrologiques individualisés et d'aire géographique limitée qui drainent l'essentiel des potentialités hydriques du pays.

Les précipitations sont concentrées pendant la saison humide qui totalise un maximum d'une centaine de jours de pluie par an. Des pluies diluviennes localisées peuvent dépasser 100 mm en moins d'une journée ; de même qu'une bonne partie des précipitations moyennes peut être concentrée en quelques jours de l'année.

Le climat varie du sub-humide au Nord, semi-aride à aride au centre, à saharien au Sud, accompagné par des périodes de sécheresse de plus en plus répétitives causant de sérieux problèmes socio-économiques. Les régimes de précipitation restent dominés par une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps. Les hauteurs moyennes annuelles des précipitations se chiffrent parfois à plus de 1000 mm dans les zones montagneuses du Nord en bordure de la Méditerranée (Bassin du Rif, Tangérois et côtes méditerranéennes Ouest). Elles décroissent progressivement en allant vers l'Est et le Sud à moins de 300 mm dans les bassins de la Moulouya, du Tensift, du Souss-Massa, des zones Sud-atlasiques, et de la zone Saharienne. Des précipitations neigeuses sont également observées sur les hauts sommets des montagnes de l'Atlas et du Rif. En effet, la pluviométrie se répartit comme suit à l'échelle du Maroc (Fig. 1) :

- supérieure à 800 mm dans la zone arrosée du nord-ouest (zone 1),
- de 600 à 800 mm dans la zone nord et la zone atlasique (zone 2),
- de 400 à 600 mm dans la zone Sebou, Bouregreg et Oum Er-Rebia (zone 3),
- de 200 à 400 mm dans le Tensift, Souss Massa et l'Oriental (zone 4),
- inférieure à 200 mm dans les zones sud atlasiques et le Sahara (zone 5).

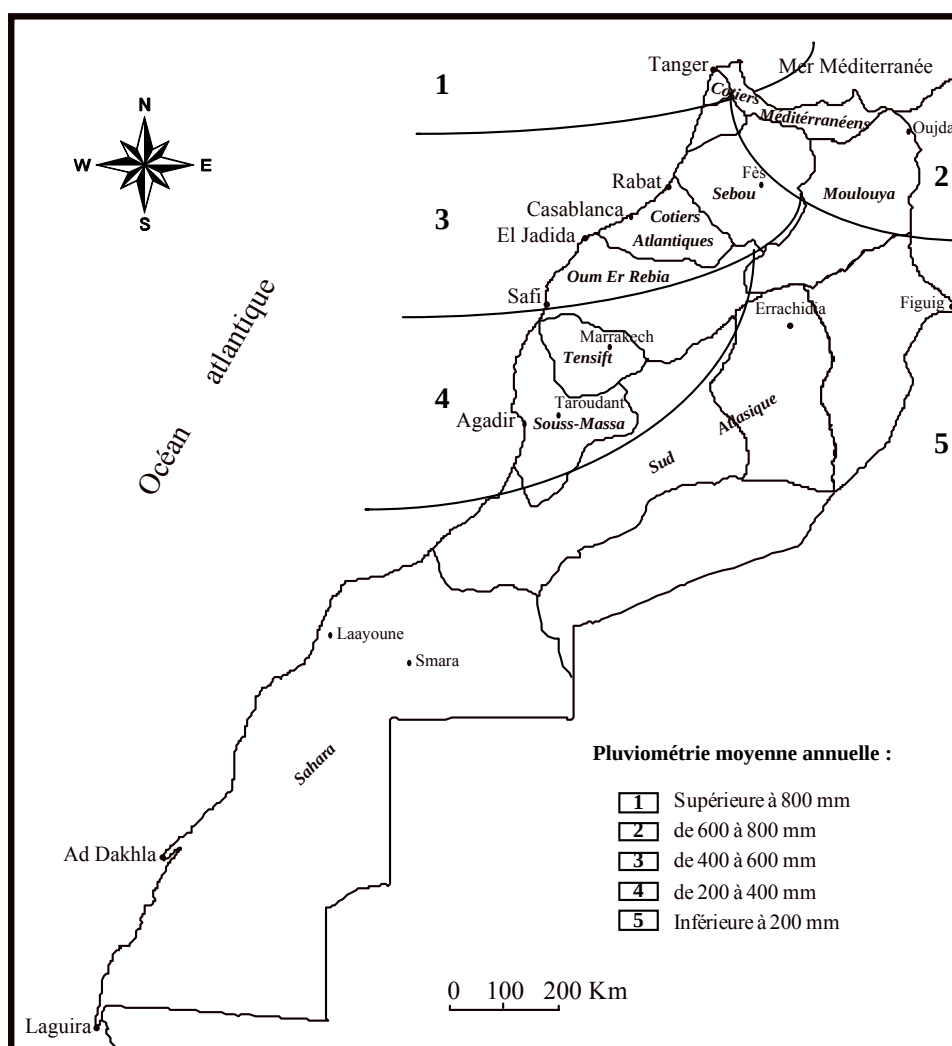


Fig. 1: Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle au Maroc

Les précipitations totales sur l'ensemble du territoire sont évaluées en année moyenne à près de 150 milliards de m^3 sur lesquels près de 29 à 30 milliards de m^3 (environ 20%) sont considérées comme pluies efficaces réparties en eaux de ruissellement (20 milliards de m^3) et en eaux infiltrées alimentant les nappes (9 milliards de m^3) (Annexe I). Suite à l'accroissement démographique, le volume mobilisable par habitant qui était de 833 m^3 par an en 1994 se réduirait à moins de 500 m^3 en l'an 2020, ce qui place le Maroc dans la catégorie des pays pauvres en eau (fort stress hydrique).

Les précipitations annuelles des années sèches peuvent atteindre des niveaux très faibles qui peuvent diminuer à moins de 60 à 75% de la normale. Les apports pluviométriques sont ainsi inégalement répartis sur le territoire national. Les régions du nord et le bassin de Sebou bien que n'occupant que 8.5% de la superficie totale du pays, ils reçoivent plus de 59.5% des précipitations globales, alors que le bassin de la Moulouya qui occupe 8.2% de cette superficie ne reçoit que 4.8% de la pluviométrie globale. L'évaluation régionale des ressources annuelles moyennes en eau superficielle est résumée dans le tableau 1.

Bassin versant	Nombre de jours de pluie	Précipitation moyenne inter annuelle		Précipitation quinquennale sèche		Précipitation Décennale sèche		Précipitation centennale sèche	
		mm	% du global	mm	% du global	mm	% du global	mm	% du global
Loukkos, Tangérois et Côtiers	73	680	9	510	10.5	450	10	320	12
Moulouya	31	245	9	135	7.8	120	8	90	9.5
Sebou	59	750	20	540	21.5	475	22	340	25.5
Bou Regreg	56	500	7	370	7	335	8	255	9.5
Oum Er Rbia	57	515	12	380	13	330	14	245	16
Tensift	36	330	8	240	9	200	9	110	7.5
Souss-Massa	54	240	6	170	6	140	6	80	5.5
Sud Atlasique	30	170	19	100	16	75	15	30	9.5
Sahara	21	50	10	30	9	22	8	9	5

Source : Direction Générale de l'Hydraulique (1999)

(en gras les bassins versants analysés)

Tab. 1: Répartition des précipitations moyennes par bassin

Aussi, les sécheresses qui ont sévi, au Maroc, au début des années 1980 et années 1990 ont montré à quel point l'économie marocaine est tributaire des hauteurs des pluies et de leur répartition dans l'année.

3) Ressources en eau

Les ressources en eau du Maroc sont caractérisées par une très forte sensibilité aux aléas climatiques (80% des ressources en eau mobilisables sont constituées par des eaux superficielles, directement liées à l'importance des précipitations), par une irrégularité temporelle et une mauvaise répartition spatiale et par une vulnérabilité à la sécheresse et à la pollution, notamment les eaux superficielles, en raison de la faiblesse des débits de base des cours d'eau (Fig. 2).

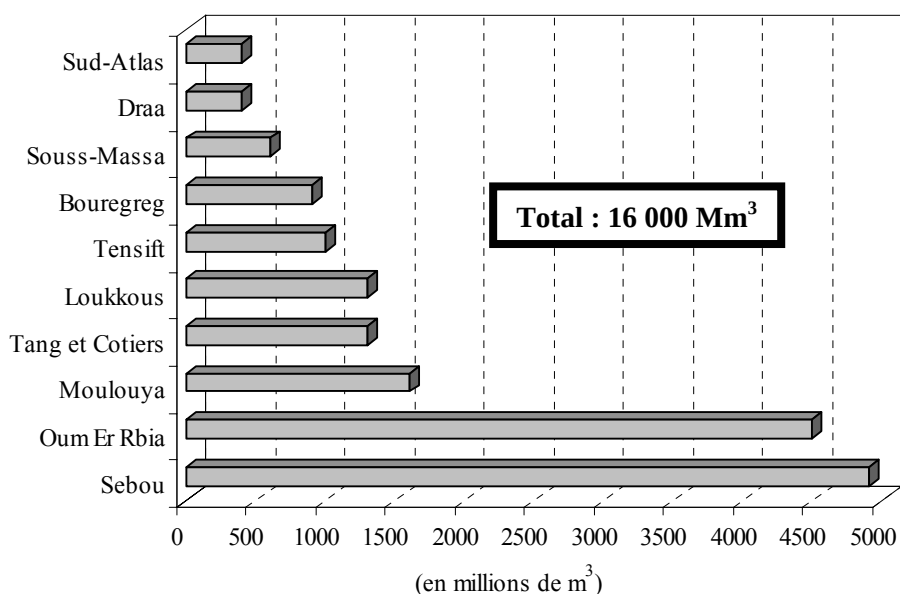


Fig. 2: Répartition des ressources en eau de surface du Maroc

Depuis son indépendance (1956), le Maroc n'a cessé de mener des efforts considérables visant à satisfaire les divers besoins (toujours grandissants) du développement socio-économique de la population et à parer aux fluctuations climatiques qu'il subit. Cette politique a permis notamment la réalisation de 97 grands barrages (totalisant une capacité de stockage d'environ 15 milliards de m³) et 8 autres sont en cours de réalisation, 13 ouvrages de transfert d'eau superficielle (des bassins excédentaires vers ceux qui sont déficitaires) et la réalisation de plusieurs dizaines de milliers de forages et puits.

Cette importante infrastructure hydraulique permet la mobilisation d'un volume moyen annuel d'environ 14 milliards de m³, permettant la satisfaction des besoins en eau de l'irrigation (83% du volume) et de l'alimentation en eau potable et industrielle du pays.

Le potentiel hydraulique réellement considéré mobilisable au Maroc, dans des conditions techniques et économiques actuelles, est évalué à 20 milliards de m³ par an (soit 13% environ des précipitations totales du pays) dont 16 milliards de m³ en eau superficielle et 4 milliards de m³ en eau souterraine (Fig. 3).

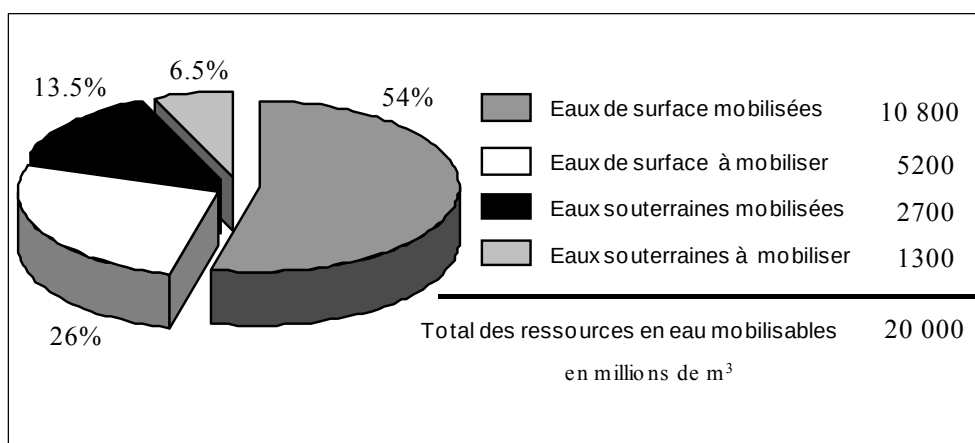


Fig. 3: Répartition des ressources en eau mobilisées

Cependant, ayant un effet sur le régime hydrologique, le régime climatique a eu une conséquence directe sur la répartition inégale entre bassins des eaux de surface. Les ressources en eau de surface sont marquées par une forte disparité de leur répartition géographique et des régimes hydrologiques très irréguliers à l'échelle saisonnière, annuelle ou interannuelle. En effet, les bassins du nord (Loukkos, Tangérois et Côtiers Méditerranéens et Sebou) disposent à eux seuls de plus de la moitié du potentiel hydraulique du royaume alors qu'ils occupent moins de 1/10 de la superficie du pays et abritent moins de 1/3 de la population (Fig. 4).

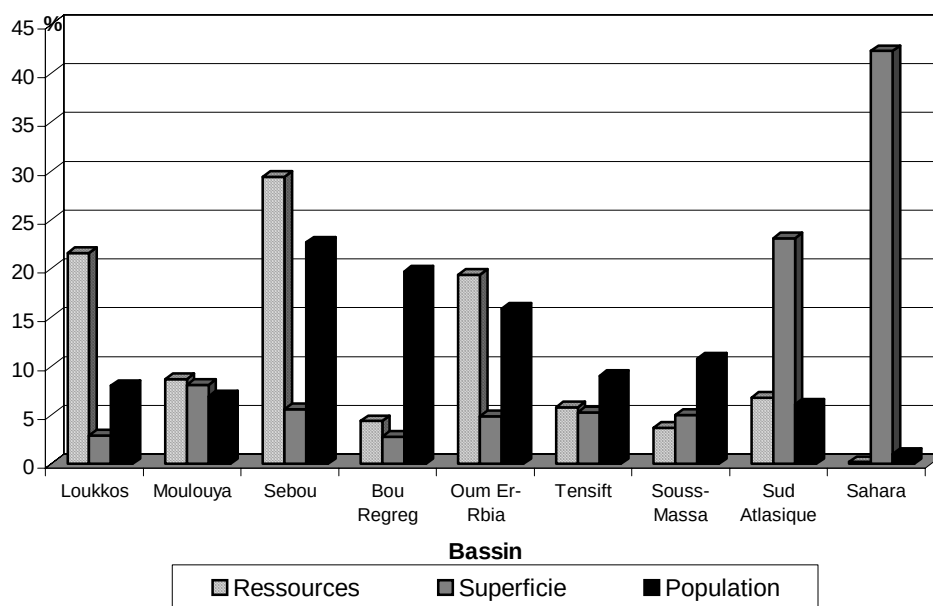


Fig. 4: Répartition géographique des ressources en eau de surface

Ces régimes hydrologiques sont marqués par des étiages prononcés avec souvent des débits nuls l'été et des crues fortes et rapides en saison humide. Ces crues favorisent l'érosion des sols à l'amont des bassins versants et provoquent des inondations à l'aval. Par ailleurs, l'occurrence d'épisodes secs de durée plus ou moins longue est également une donnée structurelle essentielle des régimes hydrologiques de la production agricole en mesure de contribuer à la satisfaction des besoins nutritionnels d'une population en croissance rapide.

4) Problématique des ressources en eau au Maroc

Au Maroc, le volume d'eau disponible par habitant et par an, indicateur de la richesse ou de la rareté de l'eau d'un pays, avoisine le seuil de 1000 m³/hab/an, communément admis comme seuil critique avant le saut vers la pénurie. Ce taux varie actuellement de 180 m³/hab/an pour les zones réputées très pauvres en ressources en eau (Souss-Massa, Sud Atlasique, Sahara) à près de 1850 m³/hab/an pour les zones du bassin du Loukkos, du Tangérois et Côtiers Méditerranéens relativement riches.

Les ressources en eau par habitant se situeraient autour de 720 m³/hab/an vers l'horizon 2020. A cette date, près de 14 millions d'habitants, soit près de 35% de la population totale du royaume disposeraient de moins de 500 m³/hab/an (Tab. 2).

La pénurie chronique d'eau devient donc une donnée structurelle qu'on ne peut plus ignorer pour tracer les politiques et les stratégies de gestion des ressources en eau au Maroc.

Bassin versant	Population (Millions d'habitant)	Disponibilité des ressources en eau (m ³ /habitant/an)			
		Année moyenne	4 années sur 5 1 année sèche	Année décennale sèche	Année centennale sèche
Loukkos, Tangérois et Côti ers	3.645	1353	745	563	418
Moulouya	2.448	1065	795	696	541
Sebou	7.918	0996	605	509	395
Bou Regreg	9.076	0109	049	039	029
Oum Er-Rbia	6.171	1232	973	910	835
Tensift	3.131	0546	324	280	240
Souss-Massa	3.250	0362	207	180	156
Sud Atlasique	2.606	0735	414	347	279
Sahara	0.625	0168	-	-	-

Source : Administration de Génie Rural / Direction du Développement et de la Gestion d'Irrigation (1999)

Tab. 2: Disponibilité des ressources en eau, projection sur 2020

Ces ressources sont limitées pour assurer sans contrainte un développement économique et social durable. En termes de ressources mobilisables, le Maroc dès le début des années 80, franchi le seuil des 1000 m³/hab/an commun admis comme seuil critique indiquant l'apparition de stress hydraulique de 1.271 m³ par habitant et par an en 1971 le seuil atteindra 688 m³/hab/an en l'an 2000 et 508 m³/hab/an. A l'horizon 2020, exception de l'Oum Er-Rbia, l'ensemble des bassins versants seront en dessous de ce seuil.

La gestion des ressources en eau rejoint des préoccupations diverses : l'aménagement des cours d'eau, la construction des barrages et leur protection contre l'envasement, la lutte contre la sécheresse et les risques d'inondation. Les dégâts considérables affectant les infrastructures hydrauliques destinées à la mobilisation des ressources en eau de surface et souterraine et à la production agricole perturbent les activités économiques du pays. Il est primordial de mettre en place des infrastructures nécessaires à la protection des vallées contre les inondations et de procéder à la construction de digues pour se protéger contre les débordements de l'oued.

5) Objectifs de ce travail

Face à cette variabilité qui détermine la disponibilité en eau, il est nécessaire de maîtriser et stocker l'eau de surface pendant les périodes humides pour pouvoir l'utiliser à l'ensemble des besoins en eau du pays pendant les périodes sèches.

Ces difficultés expriment donc clairement le besoin avéré d'approfondir la connaissance des régimes hydrologiques en régions semi-arides à arides, leur variabilité spatiale et temporelle, sur des bassins versants pilotes et représentatifs du Maroc et la maîtrise des phénomènes hydrologiques extrêmes tels que les crues et la sécheresse pour aboutir à une vision générale sur leur mode de fonctionnement hydrologique.

Au Maroc, on s'est intéressé, depuis plusieurs années, à l'étude des phénomènes d'écoulement extrême ; suite au fameux événement de la crue de l'oued Ourika, survenue d'une manière brutale et inattendue le 17 Août 1995, à l'origine des pertes humaines et des dégâts matériels d'une portée très considérable causés par ces inondations. Le bassin de l'Ourika est caractérisé par des pentes fortes et des terrains relativement imperméables, de nature lithologique variée. Ceci confère aux écoulements un caractère torrentiel et boueux, et offre un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau.

Deux autres crues d'intensités plus faibles ont affecté cette région pendant la même année. Les précipitations torrentielles et les éboulements qui se sont poursuivis ont balayé sur leur passage des infrastructures routières, des terres agricoles, des bâtiments ainsi qu'une grande partie des infrastructures d'irrigation. Au total, les dégâts matériels (production végétale et animale, réseau hydro-agricole et dégâts fonciers) sont estimés à 155 millions de dirhams (environ 15 millions de dollars US). Ceci n'a pas manqué de provoquer un grand déséquilibre au niveau des systèmes de production et de l'environnement écologique.

Si ces phénomènes exceptionnels sont suffisamment étudiés sous certains climats tempérés (Ambroise, 1998), il n'en n'est pas de même pour les climats à déficit hydrique et notamment dans les pays en voie de développement où l'équipement des stations de mesure reste très limité.

La présente recherche a été faite essentiellement sur quatre grands bassins versants représentatifs du Maroc situés en climat semi-aride qui sont le bassin versant de la Moulouya (Région de la Moulouya, Moyen Atlas), les Bassins Côtiers Méditerranéens (Région Nord du Maroc, Rif), le bassin versant de Tensift (Région de Marrakech, versant nord du Haut Atlas de Marrakech) et les bassins versants de Ziz-Rhéris et Guir (Région d'Errachidia, versant sud du Haut Atlas de Marrakech).

Cette région d'étude a été choisie car elle est soumise aux influences contrastées de la Méditerranée au Nord (la Moulouya et les bassins Côtiers Méditerranéens), de l'Océan atlantique à l'Ouest (Tensift) et du Sahara au Sud (Ziz- Rhéris et Guir). Le choix s'est porté aussi du fait de la qualité et de la disponibilité des données, et en fonction des risques, manque d'eau et transfert massif d'eau intra ou inter-bassins pour équilibrer la répartition des eaux entre les bassins disposant de ressources en eaux excédentaires et ceux qui en sont déficitaires.

6) Présentation du manuscrit

Le manuscrit comporte trois parties :

↳ La **première partie** est consacrée à la description générale des secteurs d'étude qui comprend la localisation géographique des différents bassins versants étudiés à l'échelle du Maroc, la détermination des différents paramètres physiques qui influencent les écoulements superficiels et des

caractéristiques géologiques (diverses affleurements perméables et imperméables) et climatologiques (aperçu sur le climat) de chaque bassin versant étudié.

↳ La **deuxième partie** détermine les divers outils du traitement statistique des données physiographiques, pour déterminer diverses affinités entre les sous bassins versants étudiés et les paramètres qui les caractérisent ainsi que l'influence de ces paramètres sur l'écoulement superficiel, et des données hydro-pluviométriques pour la caractérisation de la variabilité spatio-temporelle du régime hydrologique au sein de chaque bassin versant étudié.

Ceci repose sur l'application des méthodes statistiques (Analyse en Composantes Principales, Analyse Factorielle Discriminante et le modèle de la Régression Multiple) pour établir la relation entre les paramètres physiques du bassin versant et les débits à son exutoire et analyser les séries chronologiques des débits et des pluies. Une analyse fréquentielle des débits extrêmes (par HYFRAN : **Hydrological Frequency Analysis**) permet l'ajustement à des lois statistiques les plus adéquates et conduit à déterminer les probabilités d'occurrence ainsi que les périodes de retour et donc une estimation des quantiles de crue au sein de chaque bassin versant.

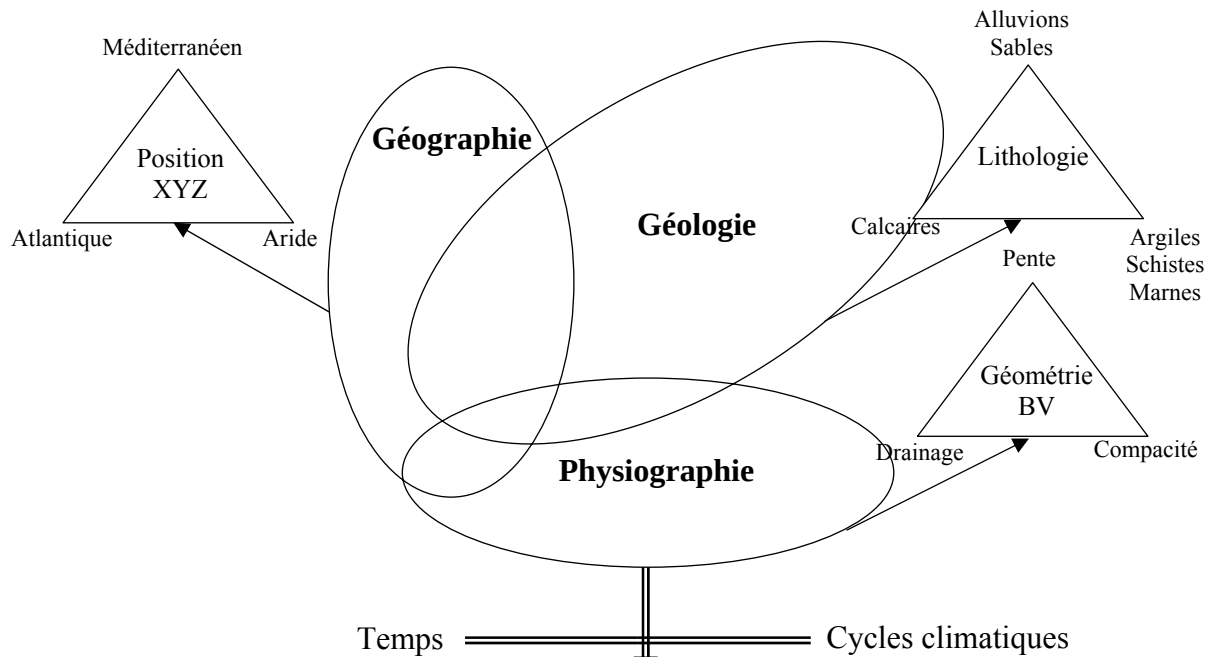
↳ La **troisième partie** concerne la modélisation des fonctions pluie-débit en zone semi-aride afin de simuler et prédire les débits en fonction des précipitations qui tomberont, sur le bassin versant par application du modèle météorologique Mero (**MMO8**) et des réseaux de neurones artificiels (**RNA** ou **ANN**).

Le modèle Mero (MMO8) a permis de caractériser l'hydrodynamisme des eaux superficielles des zones semi-arides en utilisant plusieurs réservoirs hydrodynamiques. Le modèle de RNA ou réseaux connexionnistes qui sont des modèles mathématiques non linéaires de type "boîte noire ou black-box" capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système hydrologique par connections entre neurones comparables à celles du cerveau humain. Cette méthode neuronale a permis de faire des prévisions des débits aux exutoires.

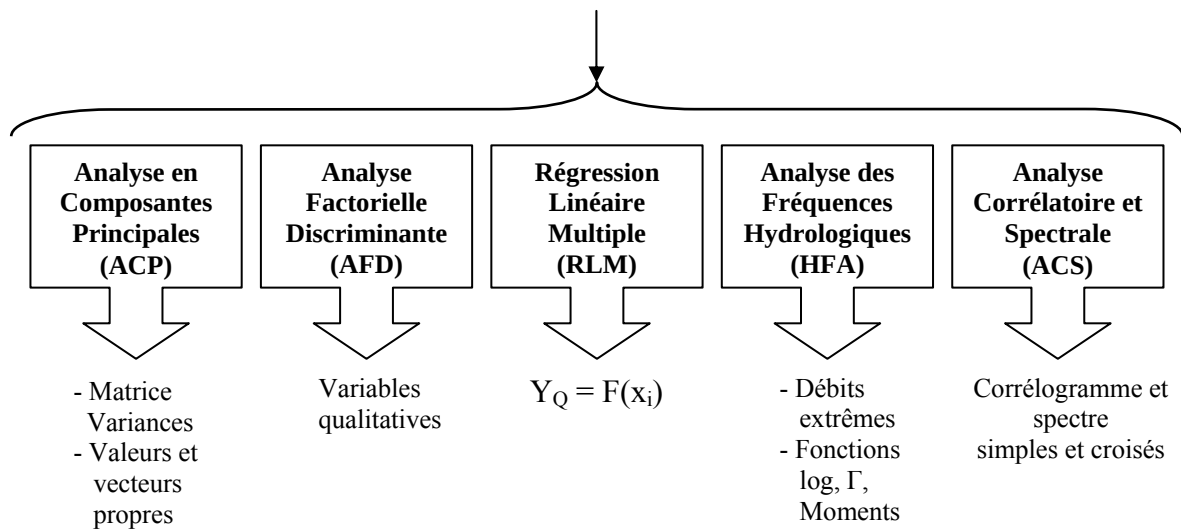
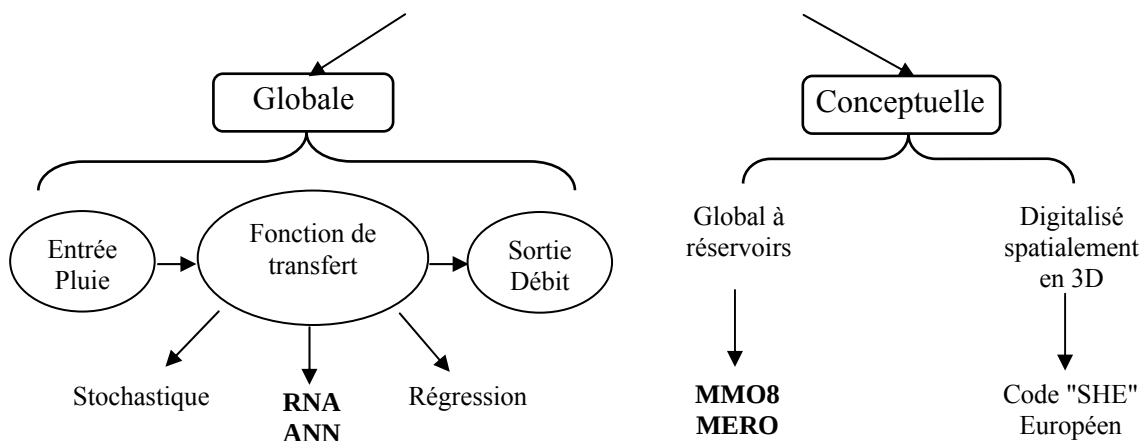
L'approche connexionniste a été comparée avec d'autres méthodes plus classiques (Régression linéaire multiple ou RLM) dans le contexte de la problématique de prévisions hydrologiques. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de cette nouvelle méthodologie de réseaux de neurones dans l'aménagement des cours d'eau et des bassins versants correspondants pour faire face aux phénomènes catastrophiques liés aux inondations. Puisque les bassins possèdent des caractéristiques physiques variées, le modèle de RNA a été donc testé sous plusieurs conditions d'écoulement.

↳ Enfin, le manuscrit se termine par une **conclusion générale** et des **recommandations**.

La méthodologie utilisée dans cette recherche est résumée dans le diagramme de présentation suivant :

1^{ère} PARTIE :**ORGANISATION DES ELEMENTS DE BASE****2^{ème} PARTIE :****ANALYSE DES DEBITS & DES PLUIES****EVOLUTION ET STATISTIQUES**

Traitement de l'information

**3^{ème} PARTIE :****LA MODELISATION HYDROLOGIQUE**

1^{ère} PARTIE :
CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES
PHYSIOGRAPHIQUES & GEOLOGIQUES
DES BASSINS ETUDIES

Cette première partie est consacrée à une description générale des différents bassins versants analysés afin de donner les indications géographiques, physiographiques et géologiques, bases indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques. En effet l'altitude, la pente et la forme d'un bassin versant reliées à la lithologie renseignent sur le type de réponse hydrologique du bassin.

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Les bassins versants étudiés appartiennent à trois différentes régions du Maroc. Il s'agit du :

- Bassin versant de la Moulouya (Région de la Moulouya) drainé par l'oued Moulouya et qui se jette dans la **Méditerranée**,
- Bassins Côtiers Méditerranéens (Région Nord du Maroc) drainés par l'oued Rhis, Nekor et Kerte et qui se déversent dans la **Méditerranée**,
- Bassins versants de Ziz-Rhéis et Guir (Région d'Errachidia) drainés respectivement par l'oued Ziz Rhéis et Guir, descendus de l'Atlas, et se perdent dans les sables du **désert**,
- Bassin versant de Tensift (Région de Marrakech) drainé par l'oued Tensift qui se déverse dans l'**Océan atlantique** (Fig. 5).

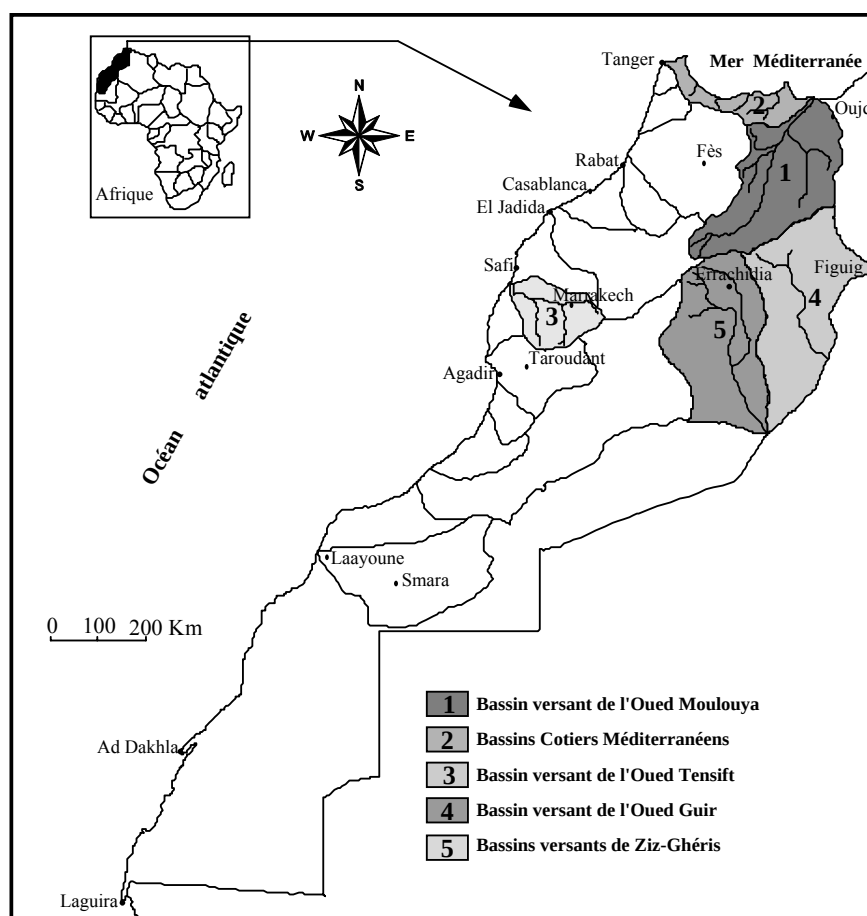


Fig. 5: Situation géographique des différents bassins versants étudiés à l'échelle du Maroc

1.1. Bassin versant de la Moulouya

Prenant naissance au pied du Haut Atlas, le bassin versant de la Moulouya s'allonge de la zone de partage des eaux du Ziz et de l'Oum Er-Rebia, jusqu'à la Méditerranée (Fig. 6). Il couvre la presque totalité du Maroc oriental. Il s'étend sur une superficie de 55 860 km². Géographiquement, il s'inscrit entre les latitudes 32° 18' et 35° 8' Nord et entre les longitudes 1° 11' et 5° 37' Ouest.

Il est limité au Nord Ouest par les bassins Côtiers Méditerranéens, à l'Ouest par le bassin versant de l'oued Sebou, au Sud Ouest par le bassin versant de l'oued Oum Er-Rebia, au Sud par le bassin versant de l'oued Ziz, au Sud Est par le bassin versant de l'oued Guir et à l'Est par le territoire algérien.

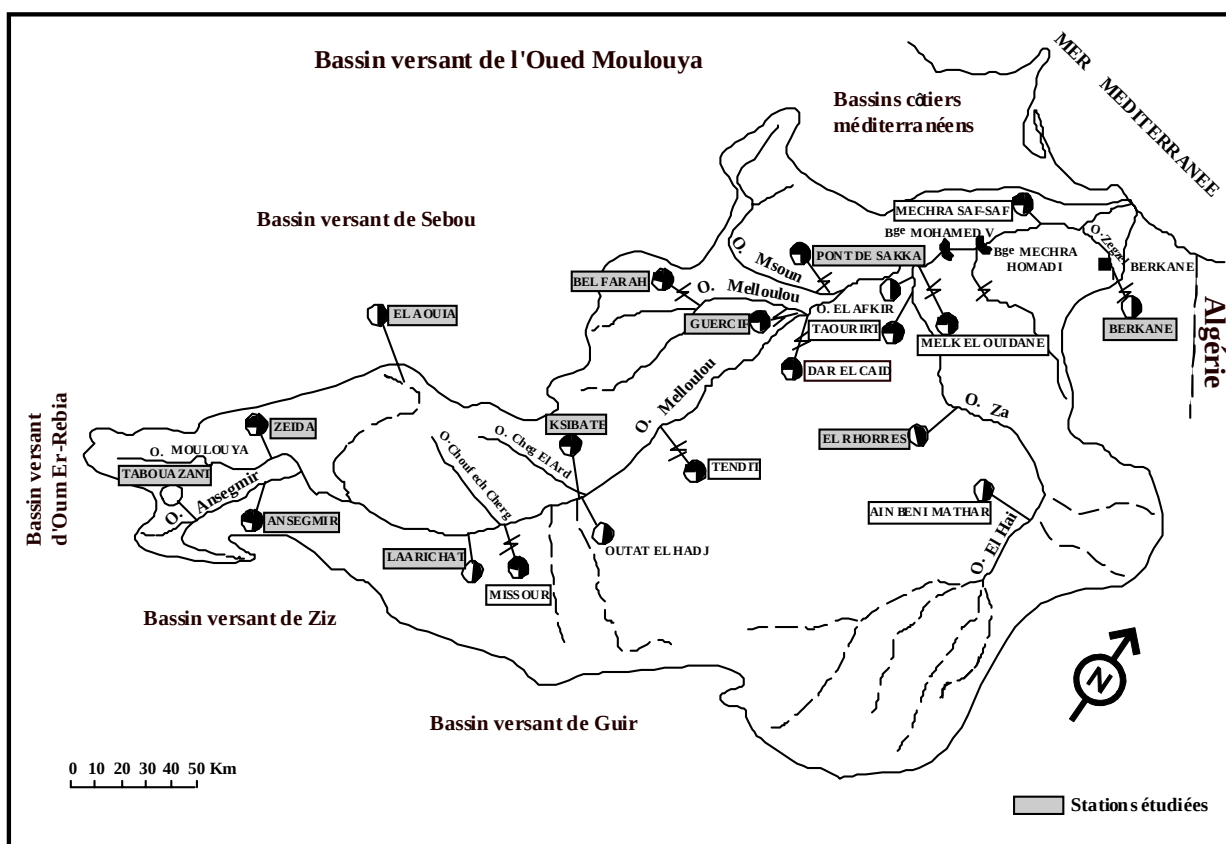


Fig. 6: Situation géographique du bassin versant de la Moulouya

- Station hydrométrique "Simplifiée" équipée d'échelles
- Station hydrométrique "Simplifiée" équipée d'échelles et d'un limnigraphe
- Station hydrométrique "Principale" équipée d'échelles et d'un téléphérique ou cyclopotence
- Station hydrométrique "Principale" équipée d'échelles, d'un limnigraphe et d'un téléphérique ou cyclopotence
- Station hydrométrique équipée de Radio
- Barrage en eau

I.2. Bassins Côtiers Méditerranéens

Ils constituent la partie Nord du Maroc. L'océan Atlantique constitue leur façade occidentale, tandis que la mer Méditerranée les bordent au Nord (Fig. 7). A l'Est, ils sont limités par le bassin versant de la Moulouya et au Sud par l'Atlas.

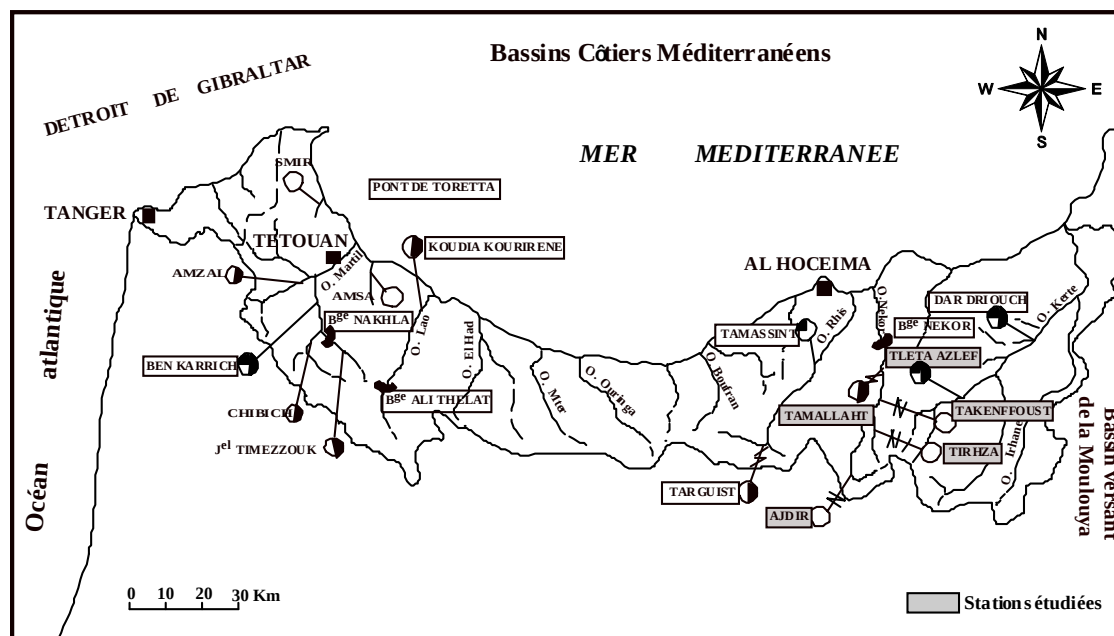


Fig. 7: Situation géographique des bassins côtiers méditerranéens

I.3. Bassin versant de Tensift

Depuis sa source à Ras El Ain jusqu'à son embouchure à Azemmour, l'oued Tensift draine un bassin versant d'une superficie de 18 500 km². Ce large domaine continental est situé entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 25' Ouest.

L'oued Tensift côtoie au Nord-Est la province d'El Kelâat Sraghna, à l'Est celle d'Azilal, au Sud-Est celle d'Ouarzazate, au Sud-Ouest les provinces d'Essaouira et au Nord-Ouest celle de Safi. Il se déverse dans l'océan atlantique (Fig. 8).

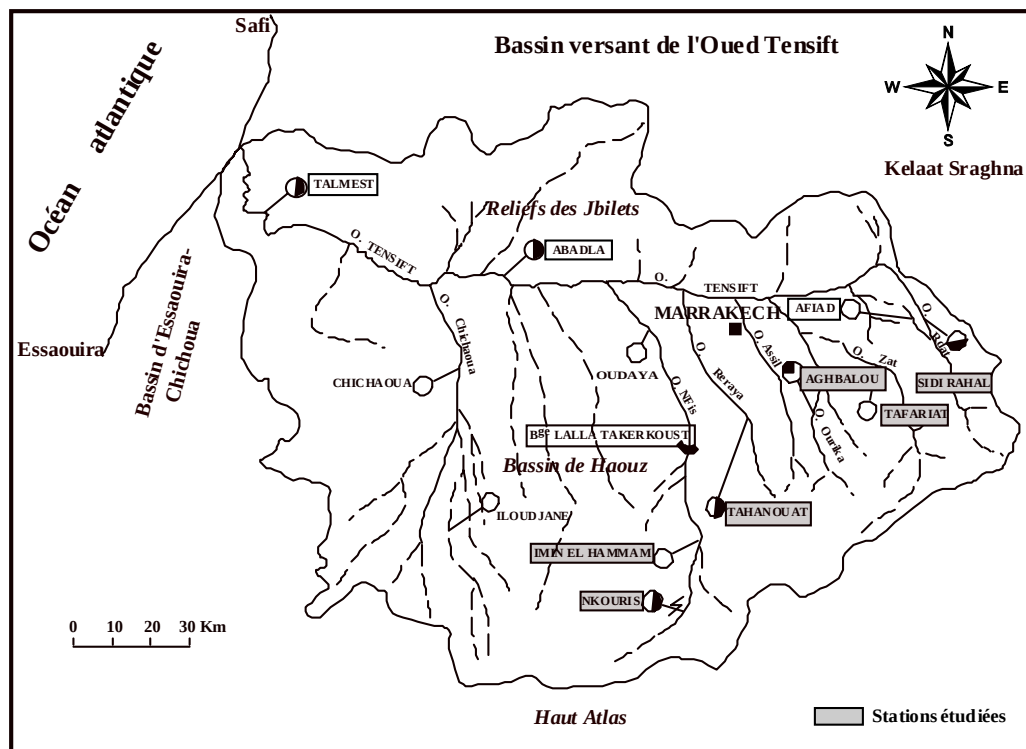


Fig. 8: Situation géographique du bassin versant de Tensift

I.4. Bassins versants de Ziz-Rhérès et Guir

Ces bassins font partie de la région d'Errachidia. Cette dernière connue communément sous le nom de "TAFILALET", est située aux confins du Sud-Est du Maroc (Fig. 9 et 10). Elle s'étend sur 60.000 km² et limitée :

- à l'Ouest et au Nord-Ouest par les provinces de Zagora, Ouarzazate, Béni Mellal et Azilal,
- au Nord et Nord-Est par les Provinces de Khénifra et Boulemane,
- au Nord-Est par la Province de Figuig,
- au Sud-Est par la frontière Algéro-Marocaine.

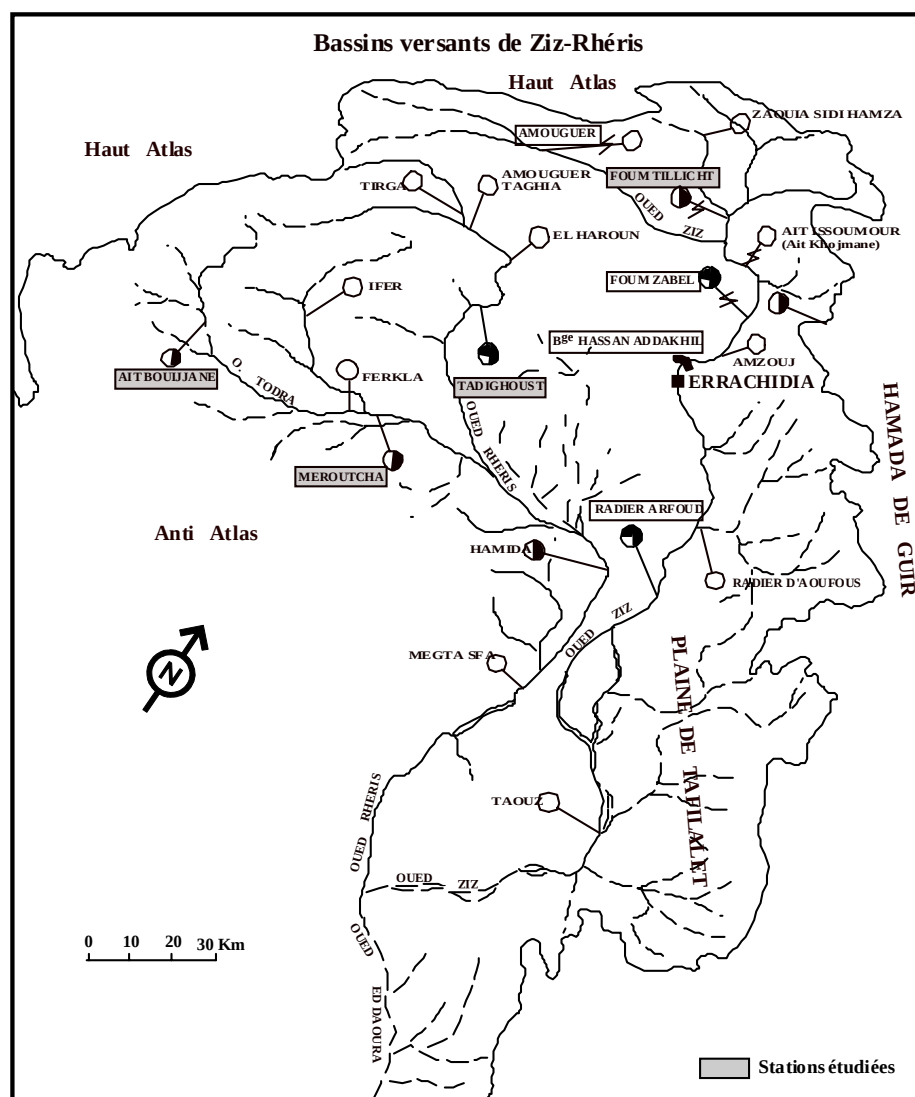


Fig. 9: Situation géographique des bassins versants de Ziz et Ghérès

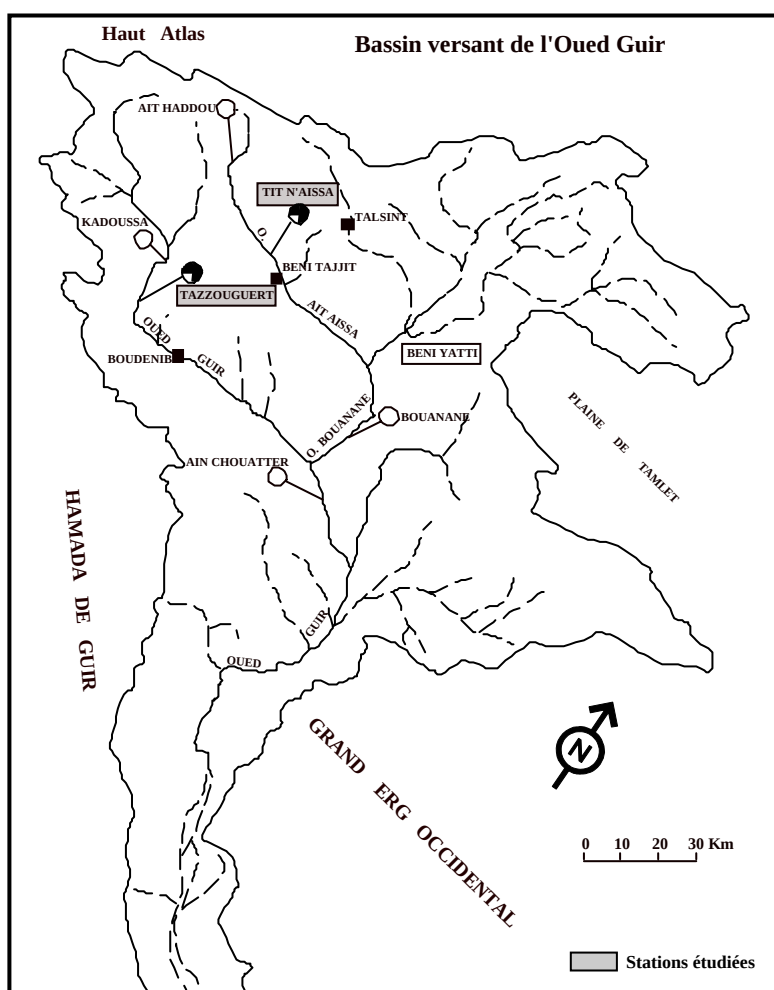


Fig. 10: Situation géographique du bassin versant de Guir

II. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES

Les principales caractéristiques physiographiques et géomorphologiques d'un bassin versant étudié ont une importance majeure car elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les modalités de l'écoulement superficiel. Les caractéristiques physiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des écoulements en période de crue ou d'étiage.

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les facteurs physiographiques suivants :

II.1. Surface

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km^2 , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation.

II.2. Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels.

II.3. Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (K_G) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant, mesuré au curvimètre en estompant les irrégularités de la limite réelle qui n'ont aucune influence sur les écoulements.

A : Superficie du bassin versant en km^2 .

Cet indice se détermine à partir d'une carte topographique en mesurant le périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

II.4. Rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius correspond à une transformation purement géométrique du bassin versant. Il prend alors une forme rectangulaire tout en gardant la même superficie, le même périmètre, le même indice de compacité et donc par conséquent la même répartition hypsométrique. Dans ce cas, les courbes de niveau deviennent parallèles aux cotés du rectangle équivalent. La climatologie, la répartition des sols, la couverture végétale et la densité de drainage restent inchangées entre les courbes de niveau.

Plus un rectangle équivalent est allongé moins il sera drainé. Les dimensions du rectangle équivalent sont déterminées par les formules suivantes (ROCHE, 1963) :

La longueur L :

$$L = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right) \quad (2)$$

La largeur l :

$$l = \frac{K_G \sqrt{A}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_G} \right)^2} \right) = \frac{A}{L} \quad (3)$$

Avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

A : Superficie du bassin versant en km^2

L : Longueur du rectangle équivalent en km

l : Largeur du rectangle équivalent en km.

Le tracé des droites de niveau du rectangle équivalent découle directement de la répartition hypsométrique cumulée.

II.5. Longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal (LOG) est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Cette distance parcourue est exprimée en km. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

Autrement dit, c'est la distance mesurée le long du cours d'eau principal depuis l'exutoire jusqu'à la ligne des partages des eaux d'un bassin versant.

II.6. Pente moyenne

C'est une caractéristique importante des bassins versants qui renseigne sur la topographie du bassin. La pente moyenne du cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin donc le temps de concentration. Elle influence sur l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. En effet, plus la pente est forte, plus la durée de concentration des eaux de ruissellement dans les affluents et le cours principal est faible, par conséquent le bassin réagira d'une façon rapide aux averses. Les pentes fortes à très fortes peuvent produire des écoulements de nature torrentielle qui sont à l'origine des crues dévastatrices.

La pente moyenne du bassin versant est donnée par ROCHE (1963) comme étant la moyenne pondérée des pentes de toutes les surfaces élémentaires pour lesquelles on peut considérer que la ligne de plus grande pente est constante. Une valeur approchée de la pente moyenne est alors donnée par la relation suivante :

$$S = \frac{l}{A} \sum Di \quad (4)$$

Avec :

S : Pente moyenne du bassin versant en %

l : Largeur du rectangle équivalent en km

D_i : Différence de niveau entre deux courbes de niveau consécutives

A : Surface élémentaire en km².

Pour le calcul de cette pente moyenne, on ne tient pas compte de la forme de la courbe hypsométrique. Cette dernière correspond à la superficie entre les courbes de niveau en fonction des altitudes correspondantes. Elle donne une idée sur la pente et l'allure du relief.

II.7. Densité de drainage (Fig. 11)

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle correspond pour un bassin versant donné de superficie A comme étant la longueur totale des cours d'eau d'ordre quelconque sur la superficie totale A du bassin versant. La densité de drainage est exprimée en km/km² ou en km⁻¹. Elle est donc :

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (5)$$

Avec :

Li : Longueur totale des cours d'eau en km

A : Superficie du bassin versant en km².

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées.

Les conditions climatiques jouent également un rôle important : les climats ayant des précipitations réparties également tout au long de l'année auront des densités de drainage plus faibles que les régions à climat très contrasté comme les zones semi-arides. Les activités humaines ont parfois un rôle important sur l'évolution hydrologique. Cette influence peut avoir un effet régulateur mais aussi un effet accélérateur du ravinement.

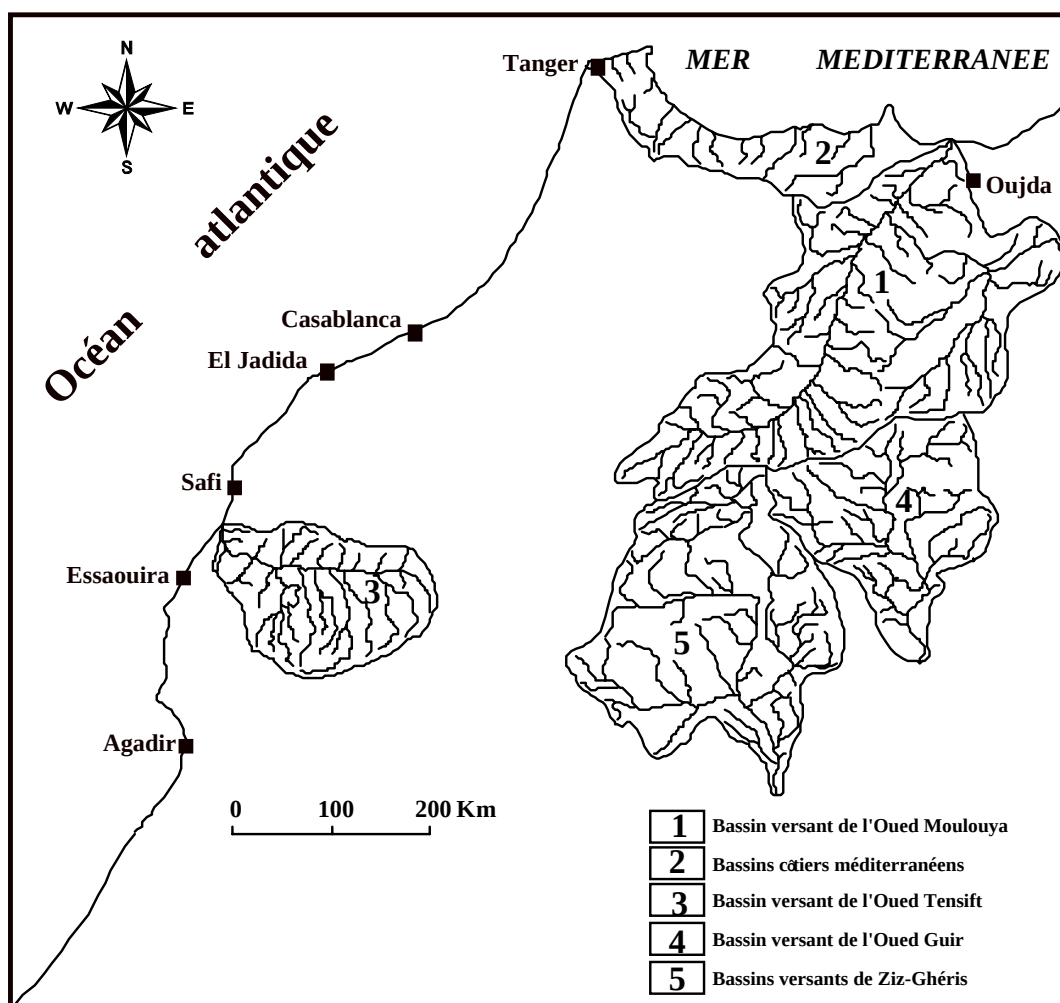


Fig. 11: Réseau hydrographique des bassins versants étudiés

II.8. Altitude de la station hydrométrique

Elle correspond à la situation de la station hydrométrique selon l'axe Z (ALT) exprimée en m. Elle est déterminée par l'intersection des deux autres axes X et Y à partir de la carte topographique.

La numérisation des différentes variables physiographiques pour chaque bassin versant étudié est donnée dans le tableau suivant (Tab. 3).

BASSIN VERSANT	STATION HYDROMETRIQUE	N°IRE (Code)	A (km ²)	P (km)	K _G	RECTANGLE EQUIVALENT		S	LON (km)	D _d	Altitude Z (m)
						L (km)	l (km)				
Ziz-Rhéris et Guir	Foum Tillicht	1508/38	1298	247	1.92	111.74	11.61	3.38	47.32	0.40	1400
	Tadiguouste	426/47	2262	337.25	1.98	157.84	14.33	1.72	40.98	0.33	1140
	Meroutcha	1548/56	4500	306.66	1.28	113.45	39.66	0.89	171	0.26	936
	Ait boujjane	355/55	651	163.86	1.79	72.57	8.97	6.60	22.31	0.65	1300
	Tazouguert	628/48	2344	334.6	1.93	150.99	15.52	1.49	91.45	0.37	1029
	Tit Naissa	330/39	1200	160	1.29	67.01	17.9	1.08	71.0	1.33	1140
Moulouya	Ansegrim	658/38	991	220.05	1.95	99.77	9.94	4.53	71.89	0.39	1450
	Tabouazant	732/38	610	99	1.12	26.2	23.3	1.14	30.0	1.33	1640
	Zaida	318/30	1840	210	1.4	82.8	22.2	2.07	70.0	0.29	1450
	Laarichate	75/31	5398	310	1.2	102.2	52.8	1.01	100.0	0.25	1060
	El Aouia	806/30	1575	160	1.12	44.9	35.1	0.44	75.0	0.57	1790
	Ksibate	440/23	960	124	1.12	31.8	30.2	1.04	50.0	0.94	950
	Bel Farah	261/16	2086	195	1.19	65.01	32.08	0.64	56.0	0.92	600
	Guercif	184/17	2850	260	1.4	102.1	27.9	0.52	90.0	0.7	360
	Pont de Zakka	302/17	2333	250	1.4	102.2	22.8	0.34	110.0	0.62	340
	El Ghoress	226/17	17688	760	1.6	325.7	54.3	0.01	290.0	0.11	620
	Berkane	1433/12	2322	195	1.13	56.1	41.4	0.25	60.0	0.4	18
Tensift	Aghbalou	2089/53	503	114	1.42	46.32	11.05	5.76	56.0	2.05	1070
	Taferiat	1562/53	515	117	1.44	47.53	10.80	5.92	34.0	1.04	760
	Tahanaout	1565/53	226	100	1.86	44.92	5.03	14.04	38.0	1.01	925
	Iguir NKouris	510/62	848	190	1.82	84.70	10.01	2.47	80.0	1.06	1100
	Imin El Hamam	1566/53	1296	210	1.63	90.46	14.32	2.10	110.0	1.08	470
	Sidi Rahal	44/54	452	130	1.71	57.11	7.91	5.55	45.0	1.03	690
Bassins Côtiers Médi- Terranéens	Tighza	385/10	55	34	1.28	11.25	4.14	25.45	13.0	1.69	600
	Takenfoust	386/10	292	97	1.59	53.85	7.03	4.45	38.5	1.77	500
	Tleta Azlef	114/10	205	60	1.17	35.43	10.31	2.87	21.5	0.39	610
	Ajdir	384/10	40	37	1.63	20.24	4.04	20.0	15.0	1.62	1020
	Tamallaht	269/5	685	130.5	1.39	74.05	12.99	2.22	57.0	1.26	275

Tab. 3: Différentes variables physiographiques des bassins versants étudiés

II.9. Impact sur les pluies et le ruissellement

Le bassin versant est un domaine complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologiques, physiographiques, humaines, etc.) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin à une sollicitation des précipitations (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certaines d'entre elles (altitude, exposition...), directement dans le processus de formation de la pluie.

L'ensemble des principales caractéristiques physiographiques ont donc une forte influence sur la répartition spatio-temporelle des précipitations et des débits au sein de chaque bassin versant étudié.

III. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES

Les paramètres morphologiques indiqués ci-dessus sont étroitement liés aux caractéristiques lithologiques des roches des différents bassins versants étudiés. Pour ce faire, il s'est avéré indispensable de bien identifier les différents affleurements géologiques et leur répartition au niveau de ces bassins (à partir de la carte géologique du Maroc au 1/1 000 000^{ème} d'échelle).

III.1. Bassin versant de la Moulouya (Fig. 12)

Dans le bassin versant de la Moulouya affleurent différentes formations dont l'âge s'étend du paléozoïque au quaternaire. On distingue :

III.1.1. Le Paléozoïque

Il est représenté par des schistes et des granites. Le Paléozoïque affleure dans la haute Moulouya sous forme de granites formant ainsi des massifs primaires de Boumia et d'Aouli, et sous forme de schistes formant la plupart des séries métamorphiques de la région.

III.1.2. Le Trias

Le Trias affleure en discordance sur les massifs anciens de la haute Moulouya. Il est représenté par des marnes, des dolérites, des argiles rouges et par des basaltes. Au niveau des chaînes des Horsts et des hauts plateaux, le Trias est formé par des marnes, des argiles et par des basaltes très altérés. Alors qu'il est formé par des argiles rouges salifères dans le bassin de Guercif.

III.1.3. Le Jurassique

Il est représenté par des faciès calcaro-dolomitiques et des dépôts terrigènes rouges formant le paléoseuil de la Haute Moulouya. Les formations carbonatées affleurent sur les bordures du Haut Atlas et du Moyen Atlas et à l'Ouest des Hauts plateaux. Elles forment presque entièrement les chaînes de Béni Snassène, des Béni Bouyachi et la chaîne des Horsts.

III.1.4. Le Crétacé

Il est constitué par des marnes, grès rouges et calcaires blancs. Ces formations affleurent essentiellement le long du Haut Atlas entre le massif d'Aouli et le Haut Atlas et à l'Est de Midelt. Dans la partie occidentale de Rekkame, il se présente sous forme de marnes à la base et de calcaires au sommet.

III.1.5. Le Tertiaire

Les formations tertiaires affleurent au niveau de la Moyenne Moulouya avec des marnes jaunes très gypsifères et gréseuses. Au niveau du Sud et Sud-Ouest de la plaine de Guercif, elles affleurent sous forme de grès, conglomérats et marnes. Dans les Hauts plateaux, le Tertiaire est représenté en grande partie par des argilites plus ou moins sableuses, des sables, des grès et des calcaires lacustres. Au niveau du Rif oriental, le Tertiaire est constitué essentiellement par des marnes et des schistes.

III.1.6. Le Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont constitués par des éboulis, des conglomérats, des argiles rouges, des limons, des encroûtements calcaires et par des coulées basaltiques. Ils affleurent sous forme de terrasses alluviales le long de l'oued Moulouya et ses principaux affluents sous forme de cône de déjection au pied du Haut Atlas et du Moyen Atlas et sous forme de vastes étendues au niveau des Hauts plateaux.

Fig. 12: Carte géologique du bassin versant de la Moulouya ➔

III.2. Bassins Côtiers Méditerranéens (Fig. 13)

Ils affleurent au niveau de la chaîne rifaine. Le Rif est un système dont la structure est sous forme de nappes. Les montagnes du Rif forment une chaîne de calcaire et de grès assez impénétrable.

Le premier tronçon de la chaîne de montagne du Rif, le Rif septentrional, est constitué par une succession de massifs calcaires en direction Nord-sud entre Jbel Moussa (841 m) et Jbel Dersa (541 m) qui s'élèvent au Nord de Tétouan. A l'Est les calcaires limitent avec la nappe du Tsirène et à l'Ouest avec les schistes des plaines de Martil-Fnideq.

La vallée du fleuve Martil traverse la Dorsale Calcaire ouvrant ainsi un accès à la plaine de Martil-Fnideq. La chaîne montagneuse interrompue par cette vallée est beaucoup plus importante au sud et atteint son expression culminante au sud de Chefchaouen, avec l'important massif qui culmine dans le Jbel Tisouka et dans le Jbel Lakraa (2159 m). A l'Est du Jbel Cherafate, les formations de la Dorsale calcaire émergent en affleurement de petites extensions vers Sebha dans la région du Jbel Imezguene et dans la côte entre Torres Alcala et Al Hoceima.

La zone centrale de la chaîne du Rif a la forme d'un grand croissant orienté en direction Ouest-Est, du bassin de M'Ter jusqu'au bassin du Nekkour. Sa conformation géologique est très simple ; les calcaires ont disparu, il reste seulement des formations de flysch. Dans les flyschs barrémo-albiens de la série de Ketama, on trouve les sommets les plus hauts de la chaîne, le Jbel Tidiguine (2456 m) et le Jbel Haman (1950 m). La série de Ketama se distingue par la prédominance des schistes noirs dans les régions méridionales et par la prédominance des grès au Nord.

A l'Est de la vallée de Nekkour le Rif oriental s'étend dans une mosaïque de formations géologiques très variées, dans lesquelles figurent des vastes extensions avec des limons très vulnérables à l'érosion. Le Jbel Mazgouf (1837 m) et le Jbel Fezzene (1129 m) sont les derniers massifs de l'extrémité orientale de la chaîne du Rif.

Fig. 13: Carte géologique des bassins côtiers méditerranéens ➔

III.3. Bassin versant de Tensift (Fig. 14)

Le bassin versant de l'oued Tensift montre une lithologie très diversifiée :

III.3.1. Le Haut Atlas

Les affleurements lithologiques sont dominés par les faciès suivants :

- des roches éruptives et métamorphiques précambriennes notamment les granites, diorites, dolérites, andésites et rhyolites,
- des schistes primaires,
- des formations secondaires fortement colorées en rouge et largement dominées par des calcaires, des grès, des marnes et des argiles.

III.3.2. Les Jbilet et Mouissates

Les schistes sont largement répandus dans les Jbilet avec des faciès et de couleurs très variés. On y distingue des schistes sombres souvent lités, des schistes argileux et des schistes gréseux avec des bancs épais de grès ou de quartzites. Par ailleurs, d'autres formations moins étendues peuvent être distinguées notamment des conglomérats, des affleurements calcaires et siliceux, des roches éruptives comme les granites et les gabbros du Précambrien.

III.3.3. Le plateau de Mouissates

Il est dominé dans une large mesure par des roches carbonatées du Jurassique.

III.3.4. Le bassin d'Essaouira-Chichaoua

Seul le secteur nord de cet ensemble géomorphologique fait partie du bassin versant du Tensift. Il s'agit d'un large plateau légèrement relevé au Sud et au Nord. Les affleurements rocheux sont dominés par des calcaires jurassiques et crétacés, des couches phosphatées marneuses et marno-calcaires du Tertiaire et enfin un Quaternaire localement enclavé dans les cuvettes synclinales ou bordant le lit actuel de l'oued Tensift sous forme de terrasses caillouteuses ou sablo-limoneuses.

III.3.5. La plaine de Haouz

Elle est caractérisée par une topographie plane et monotone s'étendant sur une largeur de 150 km d'Est en Ouest. Le socle primaire schisteux est recouvert par des formations secondaires et tertiaires variées, notamment des grès rouges du Permo-Trias ainsi que des calcaires, marnes et grès du Crétacé et de l'Eocène. Le remplissage quaternaire est assuré par des épandages alluviaux caillouteux, limoneux ou sableux, dont les plus anciens sont surmontés d'une carapace calcaire.

Fig. 14: Carte géologique du bassin versant de Tensift ➔

III.4. Bassins versants de Ziz-Rh ris et Guir (Fig. 15 et 16)

Ils présentent une lithologie très variée :

III.4.1. Le Pal ozo ique

Les affleurements pal ozo iques sont rares et le meilleur affleurement se trouve au sud du tunnel de Foum Zaabel. Il est représenté par des schistes rouges très durs et diaclasés, surmontant des schistes verts lustrés en plaquettes.

III.4.2. Le Trias

Il est représenté par :

- une série p litico-argileuse, débutant par des conglomérats polygéniques et dragées quartzo-feldspathiques, puis des grès rouges à intercalations argileuses,
- une série de basaltes doléritiques, dans lesquels, sont parfois interstratifiés des niveaux de calcaires siliceux,
- les basaltes sont recouverts par des argiles rouges, un peu violacées, plus au moins gréseuses et parfois gypsifères.

III.4.3. Le Jurassique

Les différentes formations jurassiques sont constituées par des couches rouges exclusivement de grès calcaires et de marnes de couleur rouge ou verte et par l'alternance de niveaux de marnes, marno-calcaires et de bancs de calcaires et calcaires gréseux.

III.4.4. Le Crétacé

La série crétacée comprend de bas en haut :

- des marnes blanches et argiles rouges à niveaux gypseux du Cénomanien,
- des bancs de calcaires décimétriques reposant directement et sans discordance apparente sur les argiles rouges à gypse,
- au sommet de la série crétacée, des dépôts détritiques fins surmontent les calcaires turoniens.

III.4.5. Le Tertiaire

Les seuls affleurements tertiaires bordent l'oued Todrha au Nord de Tinghir. Ils sont formés essentiellement de calcaires, de grès-calcaires plus au moins consolidés et de grès blancs ou violacés tendres et mal consolidés.

III.4.6. Le Quaternaire

On distingue :

- le Quaternaire ancien : Ces dépôts sont des encroûtements conglomératiques   éléments anguleux,
- le Quaternaire moyen : Il constitue la majorité des encroûtements superficiels,

- le Quaternaire récent : Il est formé d'éboulis de pentes et d'alluvions qui bordent le parcours des oueds Ziz, Rhéris, Todrha et Guir.

Fig. 15: Carte géologique des bassins versants de Ziz-Rhéris ➡

Fig. 16: Carte géologique du bassin versant de Guir ➡

Le tableau 4 donne la répartition des différentes formations lithologiques en pourcentage des bassins versants étudiés.

	Granites et roches volcaniques	Schistes et gneiss	Marnes et argiles	Calcaires	Grès	Alluvions
	GRV (%)	SGN (%)	MAR (%)	CAL (%)	GRS (%)	ALL (%)
	Terrains imperméables			Terrains perméables à semi-perméables		
Moulouya	2.59	1.85	14.4	32.29	7.4	35.5
Côtièrs méditerranéens	5	5	25	30	30	5
Tensift	15	30	10	6	9	30
Ziz-Rhéris	2	15	11	35	22	15
Guir	2	12	15	6	5	65

Tab. 4: Répartition géographique des différentes formations lithologiques en % des bassins versants étudiés

III.5. Impact de la géologie sur l'hydrologie

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en général une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

Les bassins versants de la Moulouya, de Ziz-Rhéris, Guir et côtiers méditerranéens sont formés essentiellement par des terrains perméables à semi-perméables qui occupent la presque totalité de la superficie du bassin, ce qui favorise l'infiltration des eaux de surface. Par contre le bassin versant de Tensift caractérisé par des pentes fortes, des affleurements géologiques essentiellement constitués par des formations imperméables, favorise l'écoulement superficiel qui se traduit par des hydrogrammes pointus, observés à l'exutoire du bassin.

Ceci confère aux écoulements un caractère torrentiel, et offre un environnement propice aux pulsations brutales des cours d'eau et par conséquent les risques d'inondation (c'est cas de la crue d'Ourika).

IV. CLIMATOLOGIE GENERALE

IV.1. Bassin versant de la Moulouya

La grande étendue et la diversité des reliefs du bassin versant de la Moulouya font que le climat est très variable d'une région à une autre. Néanmoins, on peut distinguer deux zones climatiques bien distinctes :

- la frange méditerranéenne, située au Nord, est caractérisée par un climat semi-aride avec deux saisons : un hiver doux et peu pluvieux allant d'octobre à mai et un été sec et chaud s'étalant de juin à septembre.
- le reste du bassin versant est caractérisé, généralement, par un climat aride où les précipitations sont très faibles et où la période sèche s'étale sur une grande période de l'année. Les hivers y sont souvent rigoureux, longs et froids, marqués parfois par des températures minimales négatives alors que les étés sont très chauds. Les hautes barrières montagneuses du Moyen Atlas et du Rif privent cette zone du bassin des influences océaniques riches en pluies. Vers le Nord, les chaînes de Béni Snassène et Béni Bouyachi, empêchent les pluies de pénétrer à l'intérieur du bassin.

Les précipitations moyennes annuelles peuvent dépasser 600 mm/an au niveau des sommets et elles ne dépassent pas 350 mm/an au niveau des plaines. Les précipitations sous forme de neige se produisent au dessus de 1400 m d'altitude. Elles ne persistent qu'au dessus de 2000 m d'altitude dans le Moyen et le Haut Atlas.

Les températures moyennes mensuelles maximales sont atteintes en juillet et août, elles varient entre 18°C et 29°C. Alors que les températures moyennes mensuelles minimales s'observent en décembre et janvier atteignant parfois 2°C. Les températures moyennes annuelles varient entre 9.3°C (Boulmane : station la plus froide) et 19°C (Guercif : station la plus chaude). Contrairement aux précipitations, les températures diminuent des basses aux hautes altitudes du bassin.

IV.2. Bassins Côtiers Méditerranéens

Dans le Nord, le climat est de type méditerranéen, tempéré par l'influence de la mer avec des hivers plus froids en altitude et des hauteurs de précipitations moyennes annuelles varient de 500 à 1000 mm (zone la plus arrosée du Nord-Ouest) et voisines de 800 mm sur le versant atlantique septentrional. Les précipitations moyennes interannuelles sont de 680 mm. La température est modérée de 7 à 18°C en hiver et de 19 à 30°C en été avec une relative humidité.

IV.3. Bassin versant de Tensift

Le régime climatique du bassin versant de l'oued Tensift est caractérisé par une grande aridité dont l'intensité est conditionnée essentiellement par l'altitude et en une moindre mesure par la continentalité.

Par ailleurs, le contraste saisonnier est très bien marqué, les pluies qui sont souvent concentrées durant la période automnale et hivernale, sont irrégulières, intenses et violentes. Le reste de l'année, la sécheresse prend une ampleur considérable surtout dans les zones de plaine où les températures et l'évaporation sont élevées.

La climatologie se caractérise donc par :

- un climat semi-aride de type continental. Les amplitudes thermiques sont assez importantes entre l'hiver et l'été : 45°C comme température maximale et 5°C comme température minimale.
- une faible pluviométrie moyenne allant de 250 à 350 mm/an avec des variations interannuelles et intersaisonnières importantes.

IV.4. Bassins versants de Ziz-Rhérès et Guir

La principale caractéristique imprégnant le climat est qu'il est semi-désertique (saharien) à forte influence continentale. C'est ainsi que le climat semi-aride est "ponctué" au niveau de la montagne et des Oasis. Les principales caractéristiques des températures sont les grands écarts tant saisonniers que journaliers. La température moyenne annuelle est de 19°C (avec une moyenne des minimale de 12.4°C et des maximale de 26.7°C), l'écart thermique journalier peut atteindre 22°C. Les écarts sont cependant importants entre le jour et la nuit, l'été et l'hiver, mais aussi entre les zones de montagnes au Nord et les plateaux désertiques au Sud.

Le régime annuel des pluies se caractérise par l'existence de deux saisons pluvieuses : l'automne et le printemps. La pluviométrie présente une grande irrégularité dans sa répartition interannuelle et dans sa répartition spatiale. Elle varie entre 250 mm en montagne (Nord) et 50 mm (Sud), en plaine, avec des fluctuations allant jusqu'à 50% avec une concentration sur une quinzaine de jours par an. Ce qui donne à la région un ensoleillement de 330 jours. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 120 mm. Le nombre de jours de pluie par an est très réduit : 25 jours en moyenne.

Des pluies orageuses provoquent des crues importantes des oueds dont certaines quelque fois dévastatrices causaient d'innombrables dégâts humains et matériels. Actuellement la région présente un important déficit en eau suite aux années de sécheresse (les années 80) qu'a connu le Maroc et qui a perturbé le fonctionnement normal des barrages. Cette pénurie d'eau a pour conséquences directes le dépérissement des palmeraies, en particulier celle de Tafilt, la baisse notable des rendements agricoles et la menace d'ensablement de la région.

Les conditions climatiques jouent également un rôle important dans le comportement hydrologique des bassins versants. En effet, les régions ayant des précipitations réparties également tout au long de l'année auront des densités de drainage plus faibles que les régions à climat très contrasté comme les zones semi-arides.

IV.5. Impact de la climatologie sur l'hydrologie

Les conditions climatiques cités précédemment pour chaque bassin versant étudié ont une grande influence sur le régime des écoulements superficiels. Ceci peut être expliqué par la répartition irrégulière des débits dans le temps et dans l'espace. Ce sont surtout les précipitations qui constituent le facteur essentiel de cette répartition hydrologique des cours d'eau et de la genèse des crues. Ceci sera l'objet de la deuxième partie de ce travail.

V. CONCLUSION

L'analyse de ces différents paramètres physiques et géomorphologiques (lithologiques) permettra une meilleure compréhension des causes des variations des régimes hydrologiques de chaque bassin versant étudié et par conséquent leur contribution dans la genèse des crues. Leur interaction détermine la variabilité des phénomènes hydrologiques dans le temps et dans l'espace.

Pour cet effet, l'analyse des données physiques et hydropluviométriques par différents outils statistiques s'est avérée nécessaire pour analyser l'influence des caractéristiques physiques sur la répartition et l'évolution spatio-temporelle des écoulements superficiels afin de mieux comprendre le comportement hydrodynamique au sein des bassins versants étudiés.

Une analyse fréquentielle des débits de crue a été effectuée pour déterminer les probabilités d'occurrence et les périodes de retour (prévisions) au niveau des différents bassins étudiés.

L'approche méthodologique adoptée est fondée sur diverses méthodes statistiques qui ont été utilisées comme outils et techniques bien adaptés à cette problématique.

Ces outils représentent une évaluation préliminaire pour l'étude de tout système hydrologique avant d'établir un modèle de son mode fonctionnement.

2^{ème} PARTIE :
TRAITEMENT DES DONNEES
PHYSIOGRAPHIQUES
& HYDROPLUVIOMETRIQUES

Après avoir défini le contexte géographique et géologique, nous abordons le domaine de l'acquisition des données et de leur traitement. Dans les zones arides, les données sont souvent discontinues et très chaotiques. Des contrastes très importants entre années déficitaires et années normales rendent les analyses statistiques délicates. Des outils intégrateurs des informations sont ici présentés.

I. AQUISITION DES DONNEES

I.1. Données physiographiques

La détermination des différentes variables physiographiques caractéristiques de chaque bassin versant étudié est obtenue à partir des cartes topographiques au 1/100 000^{ème} d'échelle. Ces facteurs, d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment aisément à partir de cartes adéquates et en recourant à des techniques digitales et à des modèles numériques qui permettent la numérisation des différentes variables physiques étudiées.

I.2. Données pluviométriques

L'ensemble des données pluviométriques de base est mis à notre disposition par la Direction Générale de l'Hydraulique (DGH) à Rabat. Les fichiers de ces données donnent les valeurs mesurées des pluies moyennes journalières des diverses stations pluviométriques de la région d'étude sur de longues périodes d'enregistrement. Ces données sont disponibles pour 11 stations pluviométriques dans le bassin versant de la Moulouya, 5 au niveau des bassins Côtiers Méditerranéens, 6 dans le bassin versant de Tensift et 6 dans les bassins versants de Ziz-Rhérès et Guir avec un total de 28 postes pluviométriques.

I.2.1. Situation des postes pluviométriques

La localisation géographique de toutes les stations pluviométriques est entreprise sur des cartes au 1/100 000 d'échelle à partir de leurs coordonnées Lambert, avec un total de 28 stations de mesure de niveaux d'eau et de débits dont 11 stations sont situées dans le bassin versant de la Moulouya (Fig. 6), 5 au niveau des bassins Côtiers Méditerranéens (Fig. 7), 6 dans le bassin versant de Tensift (Fig. 8) et 6 stations pour les bassins versants de Ziz-Rhérès et Guir (Fig. 9 et 10).

I.2.2. Caractéristiques des postes pluviométriques

La liste des stations pluviométriques étudiées est représentée au tableau 5. Ce dernier montre les caractéristiques principales des différentes stations. Ces stations présentent une longue période d'enregistrement de données qui diffère d'une station à une autre.

Bassin versant	Station pluviométrique	N°IRE	D.M.S	Coordonnées		Altitude Z (m)	N (années)
				X (m)	Y (m)		
ZIZ	Foum Tillich	3887	1975	580.000	192.000	1400	22
RHERIS	Tadigouste	7320	1962	543.700	140.500	1150	34
	Meroutcha	5236	184	549.000	107.300	930	11
	Ait bouijane	696	1968	485.000	95.000	1350	21
GUIR	Tazouguert	8100	1971	652.550	161.100	1035	36
	Tit Naissa	8980	1977	676.700	194.000	1150	20
MOULOUYA	Ansegmir	1088	1959	545.500	238.600	1400	38
	Tabouazant	7281	1978	531.150	217.450	1640	32
	Zaida	8928	1964	541.100	247.000	1470	38
	Laarichate	5028	1975	610.750	225.750	1060	11
	El Aouia	3236	1976	567.100	294.700	1800	20
	Ksibate	5020	1975	648.300	307.700	950	22
	Bel Farah	1628	1967	657.000	391.200	600	35
	Guercif	4016	1962	689.000	404.400	332	43
	Pont de Zakka	6268	1967	422.500	691.000	340	14
	El Ghoress	3520	1978	755.500	403.650	620	26
TENSIFT	Berkane	1848	1953	780.900	485.000	160	23
	Aghbalou	2089	1969	276.150	483.050	1070	31
	Taferiat	1562	1962	291.250	107.500	760	30
	Tahanaout	1565	1962	255.900	480.400	925	30
	Iguir NKouris	510	1974	238.900	453.800	1100	30
	Imin El Hamam	1566	1966	241.400	724.400	470	31
BASSINS COTIERS MEDITERRA-NEENS	Sidi Rahal	44	1963	303.100	117.800	690	30
	Tighza	8434	1978	645.200	475.500	620	18
	Takenfoust	7588	1978	636.400	478.250	500	9
	Tleta Azlef	8592	1966	659.200	477.400	600	28
	Ajdir	0879	1978	630.150	461.250	1030	19
	Tamallaht	7737	1978	645.300	488.200	275	31

Tab. 5: Liste des différentes stations pluviométriques avec leurs principales caractéristiques

(N°IRE : Numéro d'Inventaire des Ressources en Eau attribué par le gestionnaire des points de mesure et D.M.S : Date de Mise en Service et N : Taille de l'échantillon ou période d'observation ou nombre d'années).

I.3. Données hydrométriques

La collecte des fichiers de données hydrométriques de base pour la région d'Errachidia, la Moulouya, Marrakech et les bassins Côtiers Méditerranéens, a été réalisée par la direction générale d'hydraulique à Rabat. Les fichiers de ces données donnent les valeurs mesurées des débits moyens journaliers des diverses stations hydrométriques de la région d'étude sur des longues périodes d'observations.

I.3.1. Situation des stations hydrométriques

La localisation géographique de l'ensemble des stations hydrométriques choisies des différents bassins versants étudiés se fait à partir des coordonnées correspondantes (Fig. 6, 7, 8, 9 et 10).

I.3.2. Caractéristiques des stations hydrométriques

La liste des différentes stations hydrométriques est présentée au tableau 6. Une station est dite principale (P) lorsque son équipement permet de mesurer les hauteurs d'eau et les débits de crues en permanence. Les stations principales sont équipées d'un limnigraphe, d'une échelle limnimétrique et d'un téléphérique pour les jaugeages.

Une station est simplifiée (S) quand elle n'est pas équipée pour jauger les crues. Les stations simplifiées disposent d'une batterie d'échelle qui peut être doublée par un limnigraphe.

Bassin versant	Station Hydrométrique	A (km ²)	Affluent ou Oued	N°IRE	Numéro identifiant	Coordonnées		Altitude Z (m)	D.M.S	Type	N (ans)
						X (m)	Y (m)				
ZIZ	Foum Tillicht	1298	Sidi hamza	1508/38	1	579.850	192.500	1400	15/10/75	P	22
RHERIS	Tadiguouste	2262	Rhêris	426/47	2	543.500	140.600	1140	15/06/61	P	34
	Meroutcha	4500	Ferkla	1548/56	3	549.000	107.300	936	15/06/77	P	11
	Ait bouijiane	651	Todrha	355/55	4	485.600	104.450	1300	15/10/60	P	21
GUIR	Tazougert	2344	Guir	628/48	5	652.595	161.045	1029	15/06/61	P	36
	Tit Naissa	1200	Ait Aissa	330/39	6	676.310	193.940	1140	15/06/77	P	20
MOULOUYA	Ansegmir	991	Ansegmir	658/38	7	545.900	238.900	1450	15/02/60	P	38
	Tabouazant	610	Ansegmir	732/38	8	531.150	217.450	1640	15/11/77	P	32
	Zaïda	1840	Moulouya	318/38	9	541.000	246.800	1450	15/03/59	P	38
	Laarichate	5398	Moulouya	75/31	10	610.650	255.750	1060	15/09/75	P	11
	El Aouia	1575	Anjil	806/30	11	567.100	294.950	1790	06/11/75	P	20
	Ksibate	960	Cheg El Ard	440/23	12	645.720	307.850	950	01/1975	P	22
	Bel Farah	2086	Meloulou	261/16	13	657.000	390.800	600	06/1961	P	35
	Guercif	2850	Meloulou	184/17	14	687.950	403.860	360	06/1954	P	43
	Pont de Zakka	2333	M'Soun	302/17	15	695.000	413.600	340	06/1974	P	14
TENSIFT	El Ghoress	17688	Za	226/17	16	775.150	403.640	620	07/1969	P	26
	Berkane	2322	Zegzel	1433/12	17	779.050	480.250	18	07/1968	P	23
	Aghbalou	503	Ourika	2089/53	18	276.150	483.050	1070	04/1969	P	31
	Taferiat	515	Zat	1562/53	19	291.250	107.500	760	02/1962	S	30
	Tahanaout	226	Reraya	1565/53	20	255.900	480.400	925	03/1962	P	30
	Iguir NKouris	848	N'Fis	510/62	21	238.900	453.800	1100	03/1974	P	30
	Imin El Hamam	1296	N'Fis	1566/53	22	241.400	724.400	470	07/1966	P	31
	Sidi Rahal	452	R'Dat	44/54	23	303.100	117.800	690	10/1963	P	30
BASSINS COTIERS MEDITERRA-NEENS	Tighza	55	Si Aissa	385/10	24	645.200	475.500	600	04/1987	S	18
	Takenfoust	292	Nekkor	386/10	25	636.440	478.240	500	04/1978	S	9
	Tleta Azlef	205	Kert	114/10	26	658.400	477.600	610	01/1967	P	28
	Ajdîr	40	Brart	384/10	27	630.550	460.850	1020	09/1978	S	19
	Tamallaht	685	Nekkor	269/5	28	645.300	488.200	275	06/1965	P	31

Tab. 6: Liste des différentes stations hydrométriques avec leurs principales caractéristiques

(N°IRE : Numéro d'Inventaire des Ressources en Eau attribué par le gestionnaire des points de mesure, D.M.S : Date de Mise en Service et N : période d'enregistrement ou nombre d'années).

II. CRITIQUE DES DONNEES

Un travail a consisté à combler les lacunes contenues dans les séries de mesures. En effet, des lacunes et discontinuités dans les séries chronologiques des pluies et des débits ont été remarquées pendant certaines années ou mois d'une année. La méthode des doubles masses (doubles cumuls) a été utilisée afin de vérifier l'homogénéité des séries de l'ensemble du réseau de postes hydrométriques et pluviométriques. On peut donc reconstituer des séries homogènes.

Il est donc indispensable, avant de traiter ces données, de se préoccuper de leur qualité et de leur représentativité au moyen de la méthode du double cumul et des régressions entre postes voisins corrélés. Le principe cette méthode graphique consiste à vérifier l'homogénéité des valeurs mesurées de la station à tester en les corrélant avec celles de référence. Cette opération permet de combler les lacunes, de tester l'homogénéité des séries de données et de critiquer les données brutes du réseau hydrométrique et pluviométrique. Cette comparaison utilise, au pas du temps choisi, non pas les valeurs observées mais leur cumul (Meylan et Musy, 1998).

L'évaluation des données manquantes à une station a été déterminée à partir des valeurs provenant de la station voisine présentant le meilleur coefficient de corrélation et ayant fonctionné durant le mois manquant. La formule la plus simple pour combler, sans erreur majeure les lacunes des séries, est de remplacer la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance mensuelle des stations hydrométriques et pluviométriques (Musy et Laglaine, 1992).

III. TRAITEMENT DES DONNEES

III.1. Analyse statistique des données physiographiques

Afin de déterminer les affinités entre les différents bassins étudiés et déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux, c'est dans ce sens que nous voulons chercher s'il existe d'autres descripteurs caractérisant cette relation en employant une analyse en composantes principales. C'est une méthode de réduction du nombre de variables permettant la représentation géométrique des observations et des variables. Cette réduction n'est possible que si les variables initiales ne sont pas indépendantes et ont des coefficients de corrélation non nuls (Bouroche et Saporta, 1980).

III.1.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

III.1.1.1. Introduction

L'analyse en Composantes Principales ou ACP est une méthode statistique d'analyse des données. Elle permet, à partir d'une matrice à n échantillons (individus) et p variables, la description du nuage dans un espace à p dimensions.

Considérons un tableau de données à n échantillons ou unités statistiques (u.s) et p variables. Les échantillons représentent les lignes du tableau et les variables ses colonnes. Pour faciliter la visualisation de l'ensemble de données, chaque u.s est projetée dans un espace à n dimensions (espace des u.s) et chaque variable peut être projetée dans un espace à p dimensions (espace des variables) et n dimensions (espace des unités statistiques).

Ainsi, on obtient un nuage de points qu'il est impossible à visualiser. Donc pour faciliter la visualisation, on projette le nuage dans un espace à deux dimensions, déterminé à partir des axes principaux ou factoriels du nuage. Cette projection permet de minimiser l'erreur de la représentation de nuage.

Pour conserver au maximum la forme du nuage donc de son inertie par rapport au centre de gravité, on travaille sur des variables centrées, l'ACP est dite centrée. De plus, afin d'éliminer l'influence de la taille des variables (problème d'échelle) dépendant des unités choisies, on considère comme variable normalisée le rapport de chaque valeur à son écart type, on réalise ainsi une ACP centrée réduite. Les variables centrées réduites sont donc sans dimension, leurs moyennes sont égales à 0 et leurs variances égales à 1.

Une fois déterminés les axes factoriels, le nuage est projeté dans les différents plans des facteurs principaux soit dans l'espace des variables, soit dans l'espace des u.s. Dans l'espace des u.s, l'ACP permettra de regrouper selon des facteurs identiques les échantillons présentant des caractères d'origine ou d'évolution similaire. L'interprétation de l'ACP consiste ensuite à déterminer les facteurs responsables (composantes principales) de la structure observée.

Le premier axe factoriel (F1) de cette représentation est tel qu'il détermine le maximum d'inertie du nuage et donc de la variance, le deuxième axe (F2) perpendiculaire au premier exprime le maximum de variance restante, le 3^{ème} axe, toujours perpendiculaire aux deux autres, est défini par le maximum d'inertie restante ; etc.

III.1.1.2. Application de L'ACP

La méthode a été appliquée sur 28 individus (sous bassins versants) et 9 variables (variables physiographiques). Les variables utilisées sont : la surface du bassin (SUP), le périmètre (PER), l'indice de compacité de Gravelius (K_G), la longueur (LON) et la largeur (LAR) du rectangle équivalent, la pente moyenne (S), la longueur du cours d'eau principal (LOG), la densité de drainage (D) et l'altitude de la station hydrométrique (ALT).

La reconstitution finale de la distribution des sous bassins versants, nous a permis de définir les axes factoriels ou facteurs responsables de cette distribution et par conséquent, faire ressortir les affinités entre les différents sous bassins versants et déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux. Les trois premiers axes expriment 85% de la variance totale ; avec 54.7% pour le premier facteur; 17.68% pour le deuxième facteur et 12.62% pour le troisième facteur.

Le tableau 7 exprime les valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation, le pourcentage de variance expliquée ainsi que celui de la variance cumulée par chacun des axes.

Axe	Valeur propre	% Total variance	Cumul Valeur propre	Cumul %
I	4.92	54.7	4.92	54.7
II	1.59	17.68	6.51	72.38
III	1.13	12.62	7.64	85

Tab. 7: Valeurs propres, pourcentage et cumul

L'analyse de la matrice de corrélations entre les variables montre que la surface du bassin (SUP), le périmètre (PER), la longueur (LON) et largeur (LAR) du rectangle équivalent et la longueur du cours d'eau principal (LOG) sont fortement liés entre eux (Tab. 8).

	SUP	PER	K _G	LON	LAR	S	LOG	D	ALT
SUP	1.00								
PER	0.92	1.00							
K _G	-0.01	0.22	1.00						
LON	0.88	0.98	0.37	1.00					
LAR	0.72	0.64	-0.51	0.48	1.00				
S	-0.32	-0.47	0.17	-0.41	-0.56	1.00			
LOG	0.90	0.89	0.00	0.84	-0.68	-0.44	1.00		
D	-0.49	-0.64	-0.11	-0.58	-0.55	0.52	-0.47	1.00	
ALT	-0.13	-0.05	0.18	-0.07	-0.08	-0.02	-0.15	-0.12	1.00

Tab. 8: Matrice de corrélations entre les variables

La matrice de corrélation montre que l'axe I est très bien corrélé positivement à SUP, PER, LOG, LARG, LONG et négativement avec D. L'axe II présente une très bonne corrélation positive avec l'indice de compacité (K_G). Par ailleurs, l'axe III est corrélé négativement avec l'altitude (ALT) (Tab.9).

	Axe I	Axe II	Axe III
SUP	0.9235	0.0174	0.2282
PER	0.9675	0.2116	0.0697
K _G	0.0269	0.9645	0.0285
LON	0.9115	0.3603	0.1290
LAR	0.7814	-0.5395	-0.1228
S	-0.5911	0.2987	0.4296
LOG	0.9172	-0.0026	0.1953
D	-0.7038	-0.0738	0.4169
ALT	-0.0839	0.3175	-0.8063

Tab. 9: Corrélations entre les variables et les axes principaux

Le cercle I-II (72.38% de l'inertie cumulée) : l'axe I est déterminé par les paramètres de dimension et oppose l'hypsométrie (Fig.17). L'axe II porte positivement l'indice de compacité de Gravelius (K_G) qui n'est opposé à aucun autre paramètre. L'altitude (ALT) est proche du centre et n'apporte donc aucune information supplémentaire.

Le cercle I-III (67.32% de l'inertie cumulée) : L'axe I a la même signification que précédemment alors que l'axe III porte négativement l'altitude (ALT). K_G est neutre. L'axe III peut donc avoir une signification topographique.

Le cercle II-III : L'axe II oppose plus nettement K_G à LAR. L'axe III a la même signification que précédemment (Cercle I-III) alors que les paramètres de dimension et hypsométriques sont localisés au centre du cercle et n'apportent plus d'informations.

Dans le plan des u.s, le plan I-II met en évidence quatre groupes : le premier formé par les sous bassins versants de Ferkla (3), Moulouya (9) et Za (16) caractérisés par les plus fortes valeurs de forme ; le sous bassin versant de Za (16) se détache nettement des deux premiers en raison de sa plus grande superficie.

Le second groupe est représenté par les sous bassins versants d'Ourika (18), Zat (19), Si Aissa (24), Nekkor (25) et Brart (27) correspondant aux plus faibles valeurs de forme avec des valeurs relativement importantes de S et D. Le troisième groupe est constitué par les sous bassins versants de Sidi hamza (1), Rhéris (2), Todrha (4), Guir (5), Ansegrim (7), Reraya (20), N'Fis (21, 22), R'Dat (23) caractérisés par un fort coefficient de Gravelius et opposé au dernier groupe formé par les sous bassins versants de Ait Aissa (6), Ansegrim (8), Moulouya (10), Anjil (11), Cheg El Ard (12), Meloulou (13, 14), M'Soun (15), Zegzel (17), Kerte (26) et Nekkor (28).

Dans le plan I-III, l'axe III permet de distinguer deux groupes d'u.s : le premier composé par les sous bassins versants situés en altitude [Sidi Hamza (1), Rhéris (2), Todrha (4), Ait Aissa (6), Ansegrim (7, 8), Moulouya (9), Anjil (11), Cheg El Ard (12), N'Fis (21)] et le second par les sous bassins situés à des altitudes plus faibles (Fig. 17).

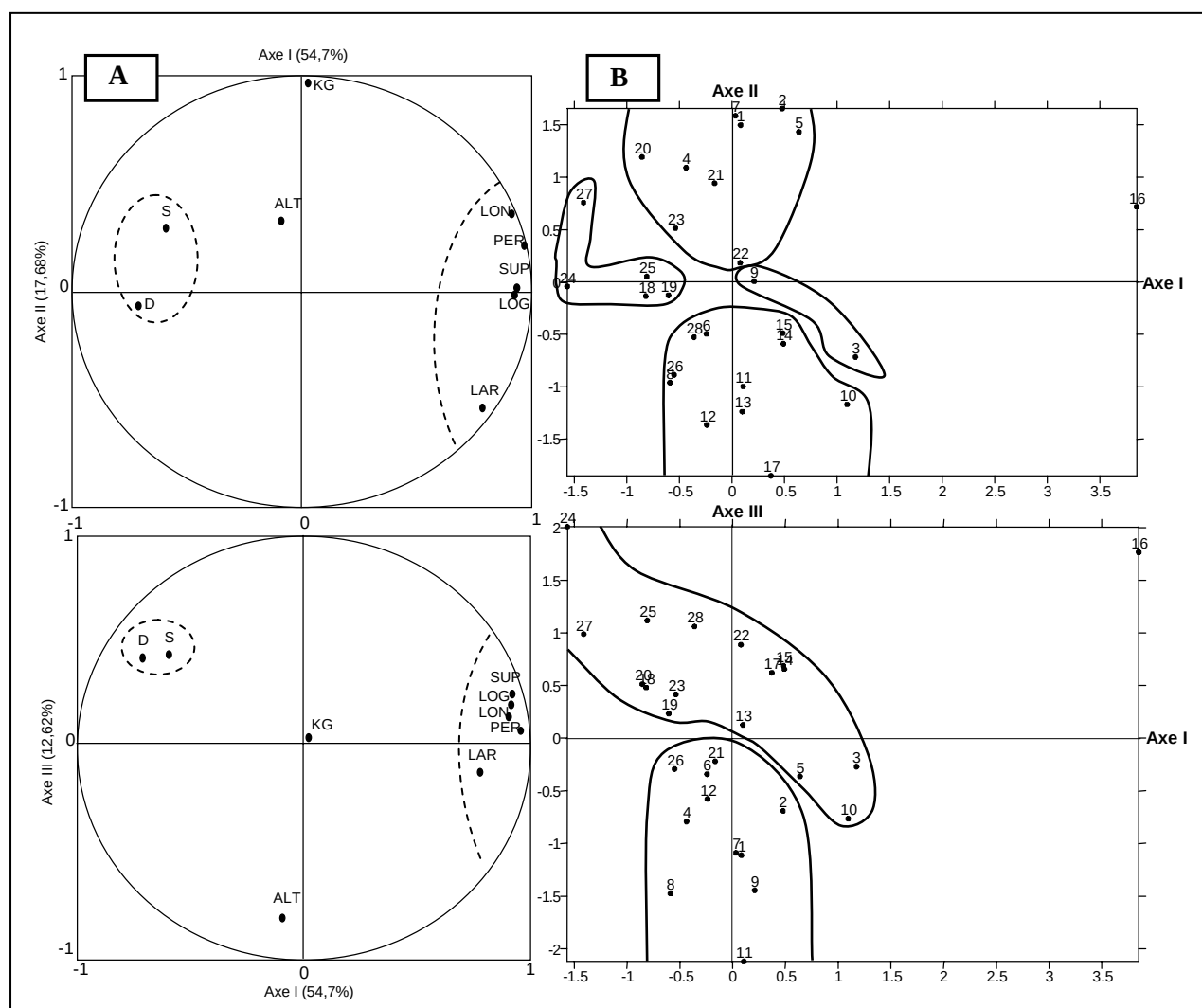


Fig. 17: Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

A : Projection des variables sur les cercles de corrélations I-II et I-III

B : Projection des individus dans les plans I-II et I-III

L'analyse en composantes principales nous a permis de mettre en évidence les affinités entre les différents sous bassins versants et de déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux.

Sur la base des regroupements que nous a donné l'ACP et pour mettre en évidence cette zonalité par rapport aux différents paramètres utilisés, une analyse factorielle discriminante a été effectuée sur le même tableau en utilisant les différents groupes obtenus par l'ACP.

III.1.2. Analyse factorielle discriminante (AFD)

III.1.2.1. Rappel

L'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) est une méthode d'analyse multidimensionnelle dérivée directement de l'analyse en composantes principales dont le but est d'étudier le rôle d'une variable qualitative (à expliquer) en plus des variables quantitatives (explicatives).

Il s'agit d'une méthode permettant de définir l'appartenance à un groupe d'individus en fonction des valeurs prises par plusieurs variables, puis de déterminer le groupe le plus probable pour un individu, connaissant uniquement les valeurs des variables qui les caractérisent.

Les variables qui décrivent les individus sont forcément des variables quantitatives, les groupes étant spécifiés par une variable qualitative. L'AFD peut être considérée comme une extension de la régression multiple dans le cas où la variable à expliquer est une variable qualitative décrivant des groupes.

L'analyse factorielle discriminante permet de classer de nouveaux individus décrits par plusieurs variables quantitatives. Connaissant un échantillon d'individus décrits par les mêmes variables, dont les groupes sont connus *à priori*, on peut analyser la façon dont les variables descriptives contribuent à la constitution des différents groupes.

L'AFD permet de redéfinir l'appartenance des individus traités aux groupes choisis *à priori* et de classer dans ces groupes des individus supplémentaires en fonction de la variance multidimensionnelle qu'ils y apportent.

Cette technique permet d'identifier les sous bassins versants en des groupes qui ont des affinités de point de vue physiographique.

III.1.2.2. Application de la méthode

Le cercle I-II (95.2% de l'inertie cumulée) : l'axe I est déterminé par les paramètres de dimension (Fig. 18) et oppose l'hypsométrie. L'axe II porte positivement l'indice de compacité de Gravelius (K_G) qui n'est opposé à aucun autre paramètre. Il semble que cet axe caractérise la dimension des sous bassins étudiés.

Le cercle I-III (89.4% de l'inertie cumulée) : L'axe I a la même signification que précédemment alors que l'axe III est mieux défini par K_G , et porte dans sa partie positive les sous bassins les plus allongés.

D'une manière générale, on retrouve les groupes identifiés par l'ACP à l'exception du sous bassin versant (4) qui est plutôt réaffecté par l'AFD au groupe 2 (Bassin versant de la Moulouya) en raison des similitudes que présentent les deux bassins. Le pourcentage des bien classés est en effet de 96.4. Il ressort que l'AFD présente la même répartition que l'ACP.

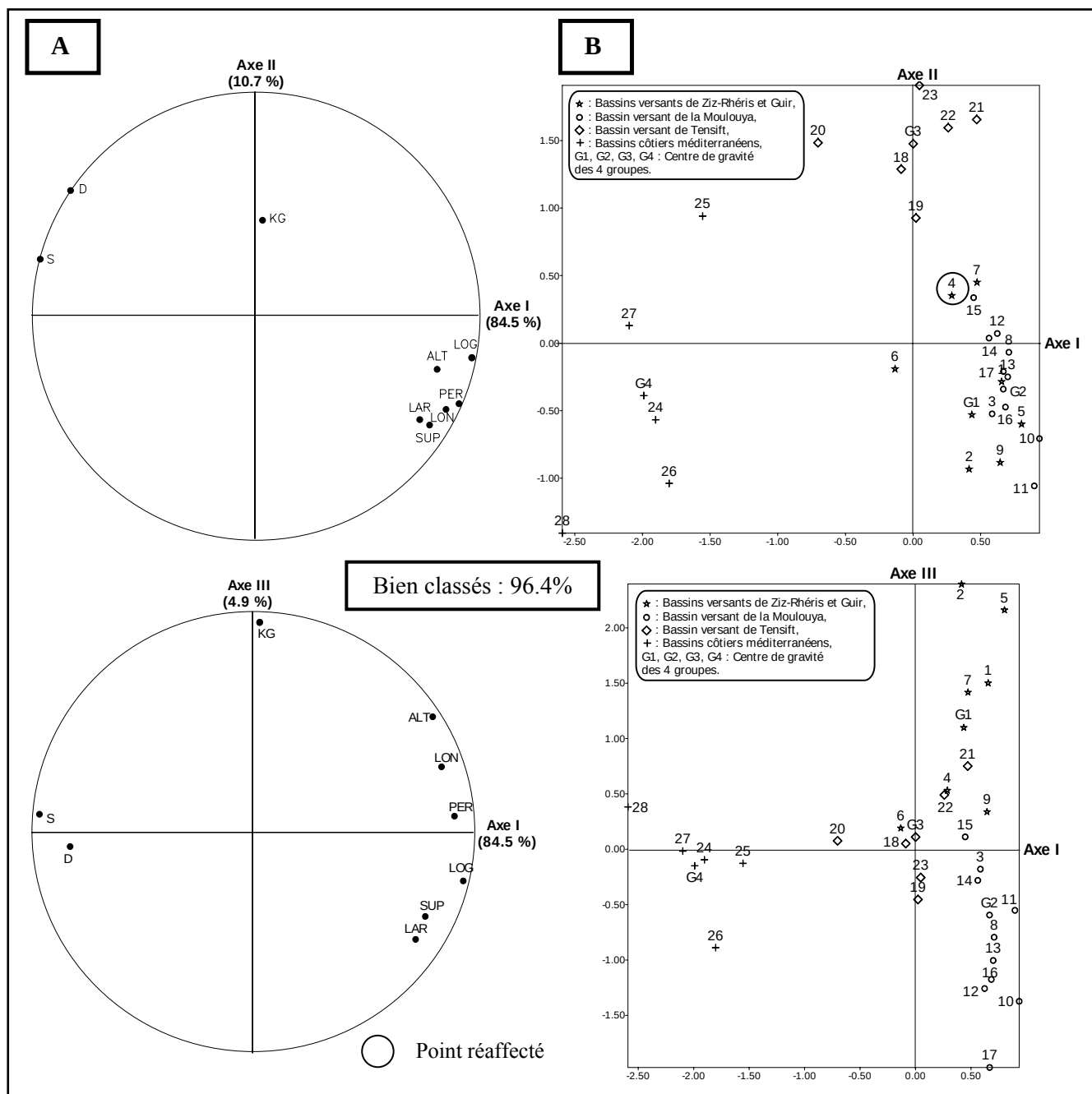


Fig. 18: Résultats de l'Analyse Factorielle Discriminante

A : Projection des variables sur les cercles de corrélations I-II et I-III

B : Projection des individus sur les plans I-II et I-III

Par conséquent, on peut considérer que ce sont surtout les paramètres de dimension qui régissent la répartition statistique des sous bassins versants. L'analyse multidimensionnelle, en analyses en composantes principales (ACP) et factorielles discriminantes (AFD), des bassins versants étudiés a montré que les distinctions et les regroupements entre eux sont liés à leur appartenance à des contextes différents et à des caractéristiques physiques assez distinctes.

Après avoir déterminé les affinités par l'ACP et la subdivision en groupes des bassins étudiés par l'AFD, une autre analyse statistique a été appliquée pour définir les relations existant entre la pluie et les différents paramètres physiographiques pour chaque bassin, basé sur la technique de la régression multiple.

III.1.3. Modèle de Régression Linéaire Multiple (RLM)

Le modèle de Régression Linéaire Multiple (RLM) est une technique qui permet de décrire la liaison entre la variable dépendante ou expliquée et un ensemble de variables explicatives. Il s'agit d'une analyse statistique dans un espace à plusieurs dimensions et constitue une simple extension de régressions polynomiales et de l'analyse des tendances de surface.

Soit une variable Y que l'on veut relier à m variables X par le modèle linéaire suivant de la forme (Holder, 1985) :

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_mX_m + \varepsilon \quad (6)$$

Avec :

Y : La variable dépendante

B_m : Les coefficients de régressions partiels

m : Le nombre de variables indépendantes.

Dans le but de déterminer les relations qui existent entre le régime hydrologique et les caractéristiques physiographiques des bassins versants, une analyse statistique a permis d'établir ces relations à partir d'un modèle de régression multiple.

L'analyse de la régression permet d'étudier la relation statistique qui existe entre le débit Q (variable dépendante) et les autres paramètres caractéristiques des bassins versants (variables indépendantes ou explicatives).

Les variables explicatives retenues sont la pluie (P), la surface du bassin (SUP), l'indice de compacité de Gravelius (K_G), l'indice de pente globale (I_G), la longueur du cours d'eau principal (LOG), la densité de drainage (D) et l'altitude de la station hydrométrique (ALT).

Pour cette analyse, on a choisit 9 sous bassins versants qui appartiennent au bassin versant de la Moulouya (Berkane, El Ghoress, Guercif, El Aouia et Ansegmir) et au bassin versant de Tensift (Aghbalou, Taferiat, Tahanouat et Imin El Hammam).

Les résultats de cette analyse aboutissent à établir cette relation avec un coefficient de corrélation $r = 0.98$. L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$Q = 1.07 P + 1.02 LOG - 0.24 ALT - 0.32 I_G - 0.33 K_G - 1.3 SUP \quad (7)$$

Une analyse des corrélations entre pluies et débits des différents bassins versants montre un coefficient de corrélation linéaire R de l'ordre de 0.91 (Fig. 19). Donc, il s'agit d'une corrélation moyenne entre les pluies qui tombent sur chaque bassin versant étudié et l'écoulement à son exutoire. Cette corrélation hydro-pluviométrique a été établie par la méthode de régression multiple selon l'équation suivante :

$$Q = 1.91 P - 26.39 \quad (8)$$

Il en résulte que les débits et le climat sont fortement liés. Une relation étroite existe également entre l'altitude maximale du bassin versant et la superficie avec $R = 0.94$:

$$Q = 1.03 P - 0.11 SUP - 0.30 ALT \quad (9)$$

Il ressort de cette analyse que les débits sont expliqués par l'ensemble des variables explicatives sélectionnées (coefficient de corrélation multiple $R = 0.98$) retenues dans l'équation de régression.

Cette analyse confirme donc l'influence des paramètres physiques de chaque bassin versant sur son écoulement superficiel.

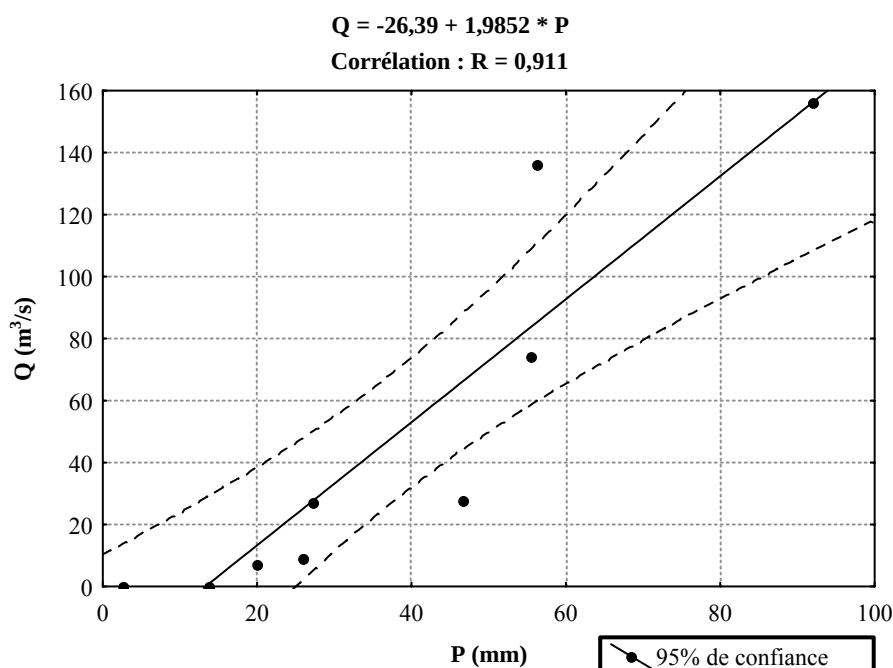


Fig. 19: Relation entre le débit et la pluie

Nous examinerons dans ce qui suit l'évolution spatio-temporelle des pluies et des débits en tenant compte du contexte géomorphologique des bassins versants étudiés.

III.2. Analyse statistique des données pluviométriques

L'étude des précipitations est basée sur l'analyse statistique des données pluviométriques enregistrées sur les principales stations des bassins versants étudiés afin d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

III.2.1. Pluies moyennes mensuelles (Fig. 20)

III.2.1.1. Bassin versant de la Moulouya

➤ Oued Ansegmir à la station d'Ansegmir :

La distribution des pluies mensuelles montre en général que les précipitations maximales sont atteintes au mois de novembre (26.2 mm) alors que les minimales sont observées au mois de juillet (4.7 mm).

III.2.1.2. Bassin versant de Tensift

➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou :

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles montre que le mois d'avril est le mois le plus pluvieux avec un maximum de 101 mm et les mois de juin, juillet et août sont les mois les plus secs. Cependant l'activité orageuse n'est pas totalement absente, elle se manifeste efficacement à l'amont en haute altitude.

III.2.1.3. Bassins versants de Ziz-Rhéris

Les pluies mensuelles sont caractérisées par un régime pluviométrique très variable d'une année à l'autre traduisant ainsi une nette irrégularité.

➤ Oued Sidi Hamza à la station de Foum Tillicht :

L'analyse des précipitations mensuelles interannuelles mesurées à la station de Foum Tillicht permet de mettre en évidence deux périodes pluvieuses : septembre- octobre et avril- mai, Les valeurs maximales sont observées au mois de mai (24.9 mm) et au mois de septembre (23.4 mm), le minimum est enregistré au mois de juillet avec 2.3 mm.

➤ Oued Todrha à la station d'Ait Bouijane :

La répartition mensuelle interannuelle des précipitations montre deux saisons pluvieuses dont la plus importante commence en automne (octobre - décembre) en totalisant plus de 50% de la lame d'eau annuelle et l'autre au printemps (mars - avril), relayées par un hiver peu arrosé, et une saison d'été nettement sèche (juin- août) avec seulement 13.6% des précipitations. En effet, le maximum est enregistré essentiellement en octobre de 17.1 mm et le minimum est observé au mois juillet de 1.8 mm.

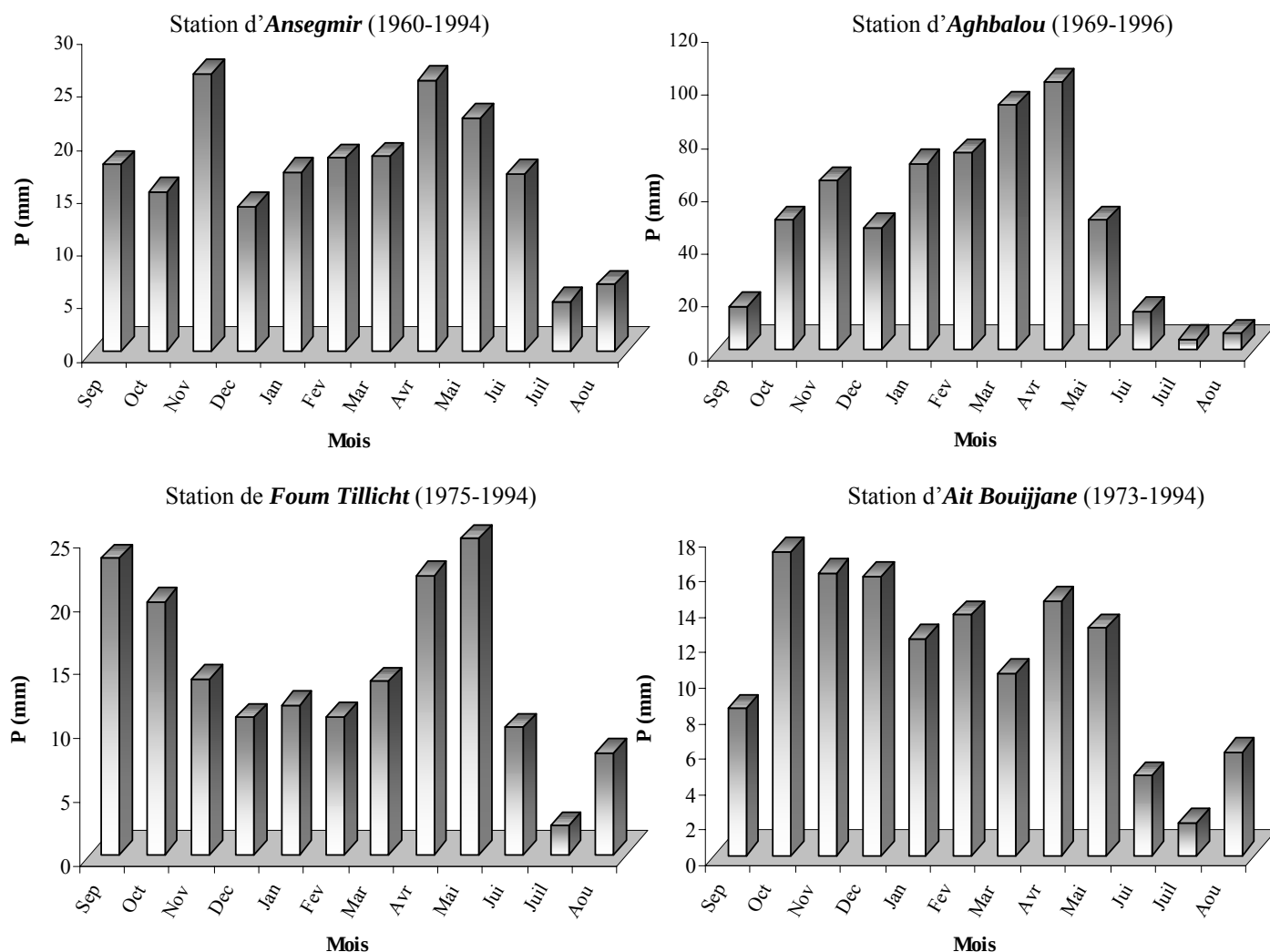


Fig. 20: Précipitations moyennes mensuelles interannuelles

III.2.2. Pluies moyennes annuelles et interannuelles (Fig. 21)

En étudiant les pluies annuelles et interannuelles, on constate une grande variabilité spatiale et temporelle des moyennes pluviométriques sur l'ensemble des stations étudiées.

III.2.2.1. Bassin versant de la Moulouya

➤ Oued Ansegmir à la station d'Ansegmir :

L'évolution des précipitations moyennes annuelles montre une alternance des années humides et des années sèches. L'année la plus sèche est 1983 avec un minimum de 101.7 mm. L'année la plus humide est 1962 avec un maximum de 384.9 mm.

III.2.2.2. Bassin versant de Tensift

➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou :

L'étude des modules pluviométriques annuels et interannuels montre une évolution temporelle des précipitations avec une alternance d'années humides et d'années sèches. On remarque que les précipitations maximales ont été enregistrées pendant l'année hydrologique 1971 avec 1066.6 mm. L'année 1992 est la plus sèche de la période d'étude avec un minimum de 276.9 mm.

III.2.2.3. Bassins versants de Ziz-Rh ris

Le module interannuel augmente du Sud vers le Nord en liaison avec l'altitude. La faible pluviométrie au Sud peut être expliquée aussi par le fait que la chaîne atlasique empêche toute influence océanique et à la présence des masses d'air chaud provenant du Sahara. En effet, les reliefs montagneux du Haut Atlas et de l'Anti Atlas constituent une barrière aux influences océaniques qui induit la rareté des pluies (en moyenne 23 jours de pluie par an à Errachidia).

Les précipitations sont donc peu abondantes et très irrégulières liées aux perturbations orographiques, responsable des pluies orageuses de l'été et aux perturbations océaniques à l'origine des pluies d'hiver et de printemps. On note une succession irrégulière des années humides et sèches et une décroissance forte des précipitations à partir du cycle 1980/1981 illustrant bien la sécheresse des années 1980. Une légère reprise apparaît à partir du cycle 1987/1988.

➤ Oued Sidi Hamza à la station de Foum Tillicht :

Les précipitations moyennes interannuelles montrent une succession des années plus arrosées avec un maximum de 315.1 mm en 1989 et des années sèches avec un minimum de 84 mm en 1992.

➤ Oued Todrha à la station d'Ait Bouijjane :

La pluviométrie est marquée par une forte irrégularité interannuelle, ce qui souligne l'appartenance au climat présaharien. Le volume moyen des précipitations annuelles s'élève à 132.2 mm pour la période 1973-1994. Au cours de cette période, l'année hydrologique 1979 a été la plus humide avec un maximum de 255 mm tandis que l'année 1982 était la plus sèche avec seulement 38.9 mm.

Le tableau 10 récapitule les différents paramètres statistiques des pluies moyennes interannuelles des bassins versants analysés.

	Ansegmir (1960-1994)	Aghbalou (1969-1996)	Foum Tillicht (1975-1994)	Ait Bouijjane (1973-1994)
Maximum	384.9	1066.6	315.1	255
Minimum	101.7	276.9	84	38.9
Moyenne	201.8	585.9	171.6	132.2
Ecart type	60.3	206.7	70.2	57.8
Coefficient de variation	0.3	0.4	0.4	0.4

Tab. 10: Paramètres statistiques des pluies moyennes interannuelles

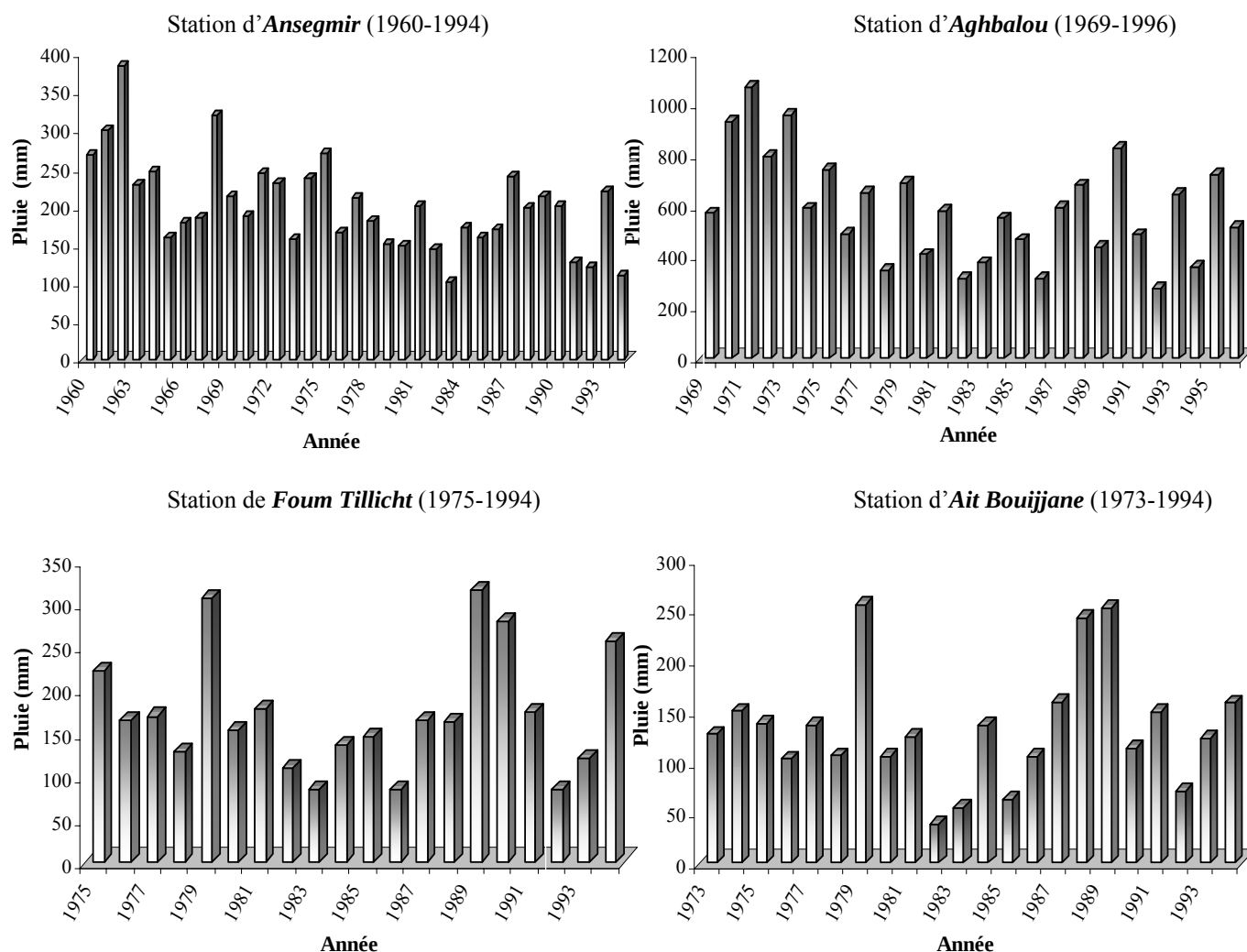


Fig. 21: Précipitations moyennes annuelles

II.3. Analyse statistique des données hydrométriques

Les données hydrologiques ont fait l'objet d'une étude statistique afin d'étudier la variabilité spatiale et temporelle des débits qui permet de caractériser les régimes d'écoulements au sein des différents bassins versants. On s'est basé sur l'analyse de séries de données débitométriques enregistrées au niveau de quatre stations de jaugeage appartenant chacune aux trois grands bassins versants étudiés.

III.3.1. Débits moyens mensuels interannuels (Fig. 22)

III.3.1.1. Bassin versant de la Moulouya

Le régime des écoulements de l'oued Moulouya et de ses principaux affluents, est très irrégulier. Les étiages se produisent en général en août et septembre.

➤ Oued Ansegrim à la station d'Ansegrim :

Les débits moyens mensuels interannuels (1960-1994) augmentent à partir du mois de février pour atteindre leurs maximums aux mois d'avril et mai (respectivement $5.19 \text{ m}^3/\text{s}$ et $6.1 \text{ m}^3/\text{s}$), puis ils diminuent jusqu'à un minimum de $0.845 \text{ m}^3/\text{s}$ au mois d'août.

III.3.1.2. Bassin versant de Tensift

➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou :

L'évolution des débits moyens mensuels dans le bassin versant de l'Ourika durant la période 1969-1996 montre que les débits minimaux se présentent en août ($1.16 \text{ m}^3/\text{s}$) avec intervention des averses orageuses qui peuvent perturber le régime hydrologique estival de l'oued Ourika donnant naissance à des crues torrentielles dévastatrices. C'est le cas de la violente crue d'Ourika enregistrée le 17/08/1995, avec un débit maximum instantané de $1030 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les débits progressent en parallèle avec la survenance des premières précipitations modérées de septembre à décembre. Dès le mois de février, les précipitations deviennent de plus en plus importantes pour atteindre leur maximum en mois d'avril et elles ruissellent sur des terrains déjà saturés et viennent s'ajouter à la fonte des neiges qui font gonfler les débits des oueds. Ces derniers atteignent leur maximum entre le mois de mars et avril avec des débits respectivement de $13.94 \text{ m}^3/\text{s}$ et $16.77 \text{ m}^3/\text{s}$.

III.3.1.3. Bassins versants de Ziz-Rhéis

On note une décroissance des débits de l'amont vers l'aval des différents oueds. Les débits maximaux sont enregistrés aux mois de novembre et avril. Les minimums sont observés en août. Les années 80 sont marquées par une diminution importante des débits, ceci reflète l'effet de la sécheresse générale qui a affecté le Maroc.

➤ Oued Sidi Hamza à la station de Fom Tilicht :

Les débits moyens mensuels enregistrés à la station de Fom Tilicht pour la période de (1975-1994) montrent des débits maximaux en avril et mai respectivement de $2.839 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3.798 \text{ m}^3/\text{s}$, les débits minimums sont observés en décembre ($0.967 \text{ m}^3/\text{s}$), en janvier ($0.908 \text{ m}^3/\text{s}$) et en août ($1.065 \text{ m}^3/\text{s}$).

➤ Oued Todrha à la station d'Ait Bouijane :

Au niveau de la station d'Ait Bouijane, on constate que les débits moyens mensuels (1973-1994) demeurent très constants sauf en juillet et septembre où ils sont plus faibles.

A la station d'Aït Bouijane (1350 m), les débits moyens mensuels reflètent un régime très régulier visiblement sans rapport direct avec le régime pluviométrique de climat présaharien. Ce fait est dû beaucoup plus à la perméabilité des terrains haut-atlasiques qu'à un régime pluviométrique de l'amont.

Ainsi, dans cette station les pics pluviaux d'octobre et d'avril (sont à peine identifiés dans la montée modérée des débits respectifs de novembre ($0.857 \text{ m}^3/\text{s}$) et de mai ($0.777 \text{ m}^3/\text{s}$), ce qui souligne l'importance du régime de résurgence jouant un rôle incontestablement régularisant. La saison d'été se traduit par une légère baisse des débits en juillet ($0.565 \text{ m}^3/\text{s}$) mais en août déjà la reprise est sensiblement exprimée à cause des orages de fin d'été qui s'abattent sur les montagnes du Haut Atlas sans qu'ils soient sensiblement perçus à Aït Bouijane.

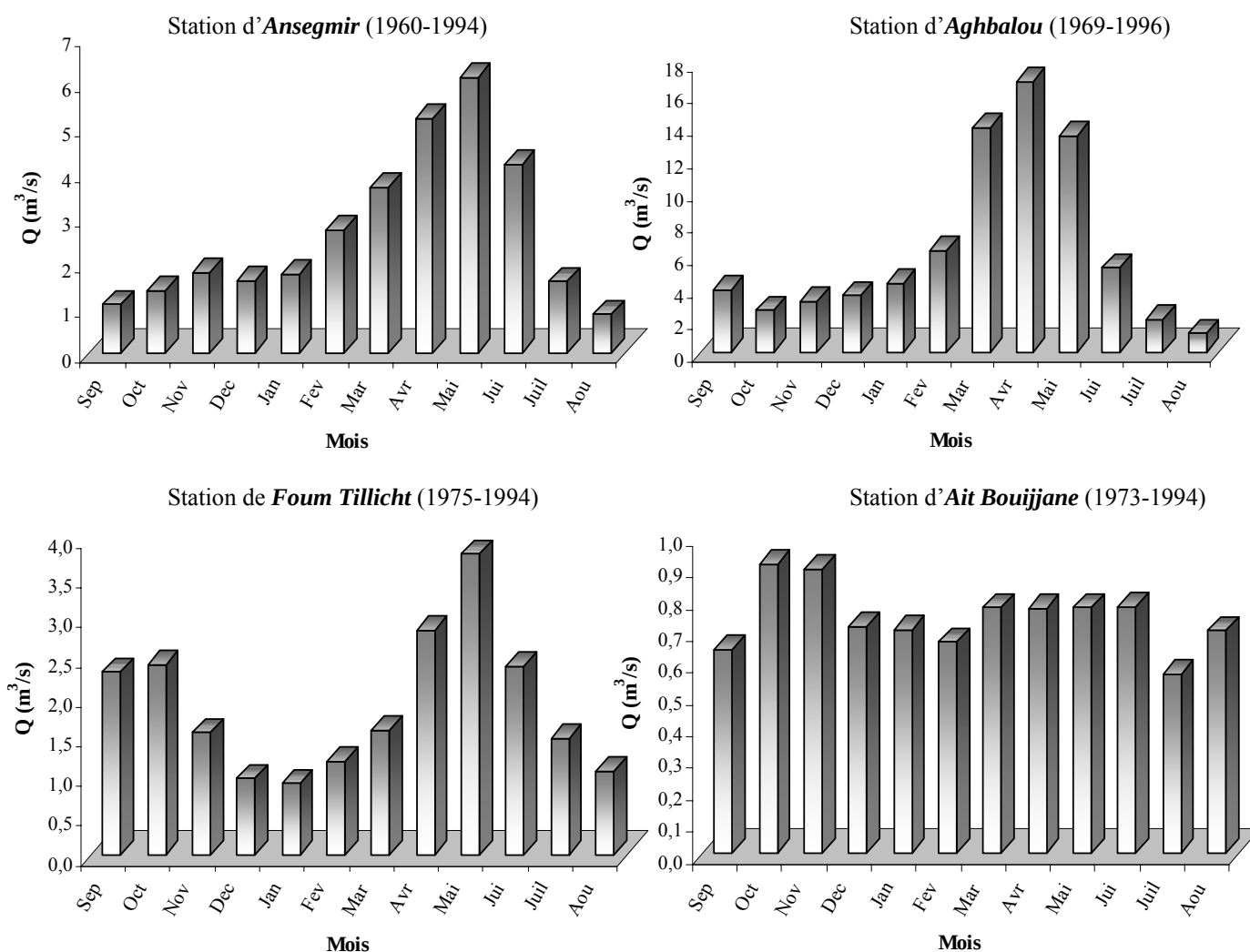


Fig. 22: Débits moyens mensuels interannuels

III.3.2. Débits moyens annuels et interannuels (Fig. 23)

L'analyse des débits moyens annuels et interannuels montre une irrégularité très nette dans l'ensemble des stations étudiées.

III.3.2.1. Bassin versant de la Moulouya

➤ Oued Ansegmir à la station d'Ansegmir :

La distribution des débits moyens annuels et interannuels à la station d'Ansegmir sont maximaux en 1962 (8.60 m³/s) et minimaux en 1983 (0.24 m³/s) avec une moyenne de 2.65 m³/s.

III.3.2.2. Bassin versant de Tensift

➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou :

Le régime hydrologique de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou augmente progressivement pour atteindre un débit moyen de 6.36 m³/s oscillant entre un minimum de 0.60 m³/s mesuré en 1982 et un maximum de 29.84 m³/s enregistré en 1979. La période de 1980 à 1986 montre des faibles débits influencés par la sécheresse généralisée sur tout le Maroc. On note un coefficient de variation très élevé de 1.02.

III.2.2.3. Bassins versants de Ziz-Rh ris

➤ Oued Sidi Hamza à la station de *Foum Tillicht* :

L'analyse des débits moyens annuels montre une irrégularité interannuelle très marquée. Les lames d'eau écoulées varient énormément d'une année à une autre avec un minimum de 0.47 m³/s en 1983 et un maximum de 5.19 m³/s en 1988. La moyenne est de 1.87 m³/s.

➤ Oued Todrha à la station d'*Ait Bouijjane* :

Le débit moyen annuel le plus important à la station d'Ait Bouijjane a été enregistré en 1989 (2.12 m³/s). Le minimum est observé en 1983 (0.23 m³/s) avec une moyenne de 0.74 m³/s.

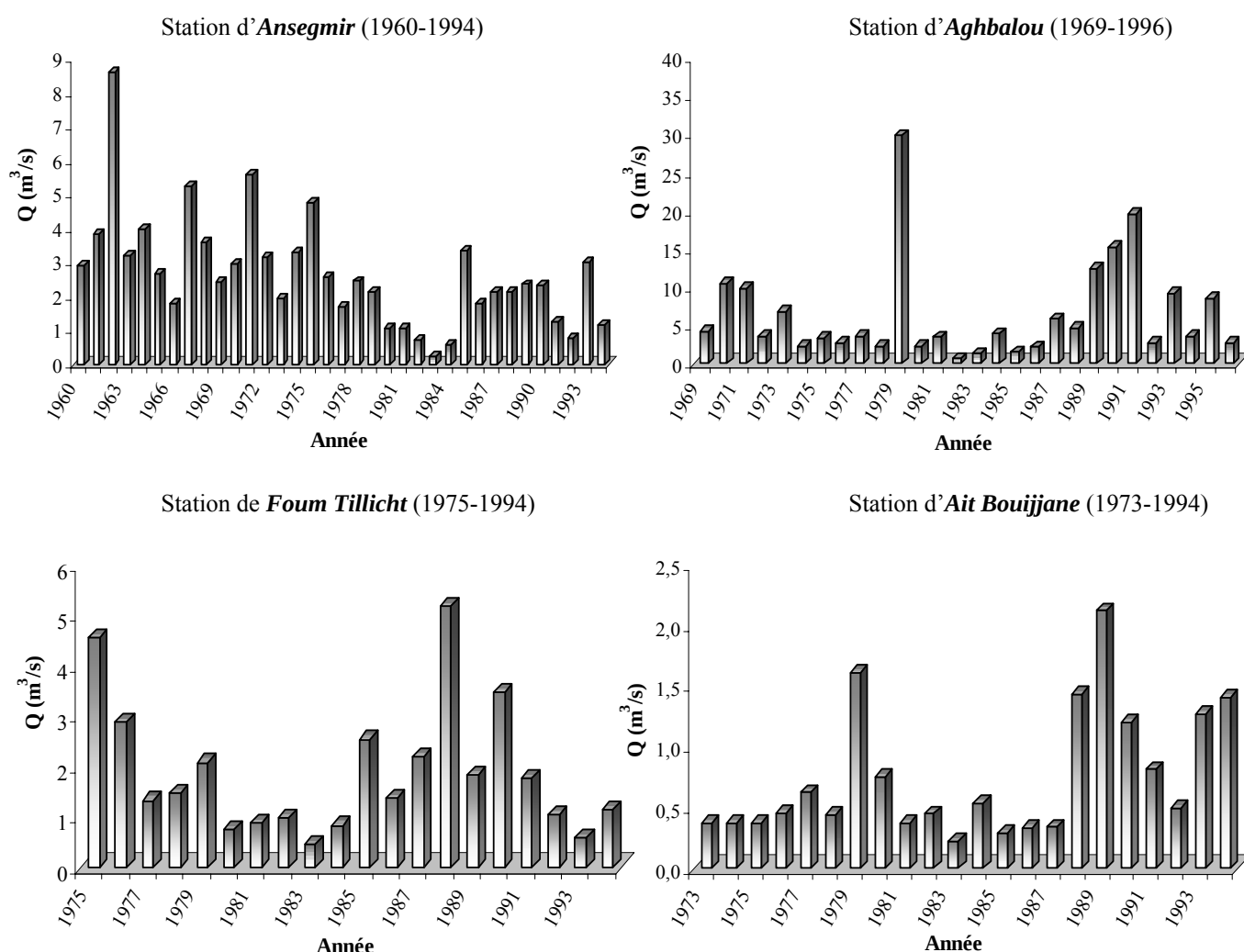


Fig. 23: Débits moyens annuels

Les différents paramètres statistiques des débits moyens interannuels sont représentés dans le tableau suivant (Tab. 11).

	Ansegrim (1960-1994)	Aghbalou (1969-1996)	Foum Tillich (1975-1994)	Ait Bouijane (1973-1994)
Maximum	8.60	29.84	5.19	2.12
Minimum	0.24	0.60	0.47	0.23
Moyenne	2.65	6.36	1.87	0.74
Ecart type	1.64	6.47	1.30	0.52
Coefficient de variation	0.62	1.02	0.69	0.71

Tab. 11: Paramètres statistiques des débits moyens interannuels

III.3.3. Analyse statistique des débits extrêmes

III.3.3.1. Introduction

L'écoulement des oueds étudiés est caractérisé par un régime de crue présentant des débits maximums instantanés. Les crues étant considérées comme des événements indépendants d'une année hydrologique à l'autre, cette représentation permet de quantifier les risques et d'estimer le débit de crue pour différentes périodes de retour T.

Si ces phénomènes exceptionnels sont suffisamment étudiés sous certains climats tempérés (Ambroise, 1998), il n'en n'est pas de même pour les climats à déficit hydrique et notamment dans les pays en voie de développement où l'équipement des stations de mesure reste très limité.

Pour cette raison, on s'est intéressé à l'analyse statistique des débits extrêmes (crues) ainsi qu'à la connaissance de leurs périodes de retour. Cette analyse fait l'objet d'une étude fréquentielle des débits maximums annuels, déterminés aux principales stations hydrométriques, qui fournit une bonne représentativité du comportement du bassin.

En ce qui concerne les lois d'ajustement statistique, la meilleure démarche est de tester plusieurs lois et de retenir celle présentant les meilleurs ajustements graphiques et statistiques. En effet, pour chaque année de la période d'étude, on retient le débit maximum instantané observé de chaque bassin versant pour une longue période d'enregistrement. L'analyse statistique détermine la loi qui ajuste le mieux cette série des débits de crue.

L'analyse statistique de la série des débits maximums annuels a été effectuée à l'aide d'un programme informatique d'analyse des fréquences hydrologiques **HYFRAN** ou HFA (**H**ydrological **F**requency **A**nalysis) qui a été développé à l'INRS-Eau, Terre et Environnement ; par l'équipe de la Chaire en hydrologie statistique (HYDRO-QUÉBEC). Il s'agit d'un logiciel d'ajustement de lois statistiques permettant l'analyse fréquentielle de séries de données des événements extrêmes (Bobée et Ashkar, 1991). Quelques fonctions sont décrites en Annexe (Méthode des moments et maximum des vraisemblance).

L'objectif de l'analyse des fréquences hydrologiques est d'interpréter des événements hydrologiques en termes de probabilité future d'une occurrence. Les trois étapes essentielles nécessitées par cette procédure sont les suivantes :

- ❖ la sélection de l'échantillon selon la forme de séries de données qui satisfait un certain critère statistique
- ❖ l'ajustement à la meilleure distribution théorique probable de l'échantillonnage utilisant une technique adaptée à la distribution,
- ❖ l'utilisation de la distribution ajustée afin de faire des extrapolations statistiques à partir d'une sous-population.

III.3.3.2. Résultats des ajustements statistiques

Les séries des débits maximums annuels ont été employées pour l'analyse des crues par ajustement à des lois statistiques. Seules les lois qui étaient réellement représentatives de l'échantillon, ont été retenues pour chaque station étudiée aux intervalles de confiance 95% (Fig. 24).

III.3.3.2.1. Bassin versant de la Moulouya

➤ Oued Ansegmir à la station d'Ansegmir :

La loi Gamma (Méthode des Moments) s'adapte mieux au bassin versant de l'oued Ansegmir à la station d'Ansegmir avec des débits très réguliers (Coefficient de variation proche de 1). Le tableau (12) représente les quantiles X_T pour différentes périodes de retour T , leurs probabilités d'occurrence q ainsi que les écart type correspondants.

T	q	X_T	Ecart type
2	0.5000	74.1	13.6
10	0.9000	225	38
50	0.9800	371	75.7
100	0.9900	433	93.1
200	0.9950	495	111
500	0.9980	577	135
1000	0.9990	638	154

Tab. 12: Estimation du quantile de crue de l'oued Ansegmir

III.3.3.2.2. Bassin versant de Tensift

➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou :

La loi Log Gamma s'adapte mieux pour le sous bassin versant de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou qui présente des débits plus irréguliers (Coefficient de variation nettement supérieur à 1). L'estimation des quantiles de crue X_T de période de retour T et leurs probabilités d'occurrence sont présentées dans le tableau (13).

T	q	X _T	Ecart type
2	0.5000	114	24.8
10	0.9000	540	161
50	0.9800	1380	539
100	0.9900	1930	821
200	0.9950	2610	1200
500	0.9980	3770	1880
1000	0.9990	4880	2600

Tab. 13: Estimation du quantile de crue de l'oued Ourika

III.3.3.2.3. Bassin versant de Ziz-Rh ris

➤ Oued Sidi Hamza à la station de Foum Tillicht :

La loi Gamma (Méthode des Moments) semble bien s'ajuster aux échantillons de débits du bassin versant de l'oued Sidi Hamza à la station de Foum Tillicht. Le tableau (14) montre les quantiles de crue à différentes périodes.

T	q	X _T	Ecart type
2	0.5000	201	34.8
10	0.9000	480	86.4
50	0.9800	729	158
100	0.9900	832	190
200	0.9950	934	223
500	0.9980	1070	268
1000	0.9990	1170	302

Tab. 14: Estimation du Quantile de crue de l'oued Sidi Hamza

➤ Oued Todrha à la station d'Ait Bouijjane :

Les débits maximums annuels du sous bassin versant de l'oued Todrha à la station d'Ait Bouijjane s'ajustent mieux à la loi Gamma (Méthode des Moments)   un intervalle de confiance de 95%. Les résultats de l'estimation du quantile X_T de crue pour différentes périodes de retour T sont représentés dans le tableau (15).

T	q	X _T	Ecart type
2	0.5000	95.5	30.4
10	0.9000	353	91.9
50	0.9800	619	195
100	0.9900	735	244
200	0.9950	851	295
500	0.9980	1010	364
1000	0.9990	1120	417

Tab. 15: Estimation du quantile de crue de l'oued Todrha

En aval de la station de jaugeage d'Ait Bouijjane, les crues seraient très violentes en raison de nombreuses confluences des oueds drainant des terrains quasi-dénudés et peu perm eables.

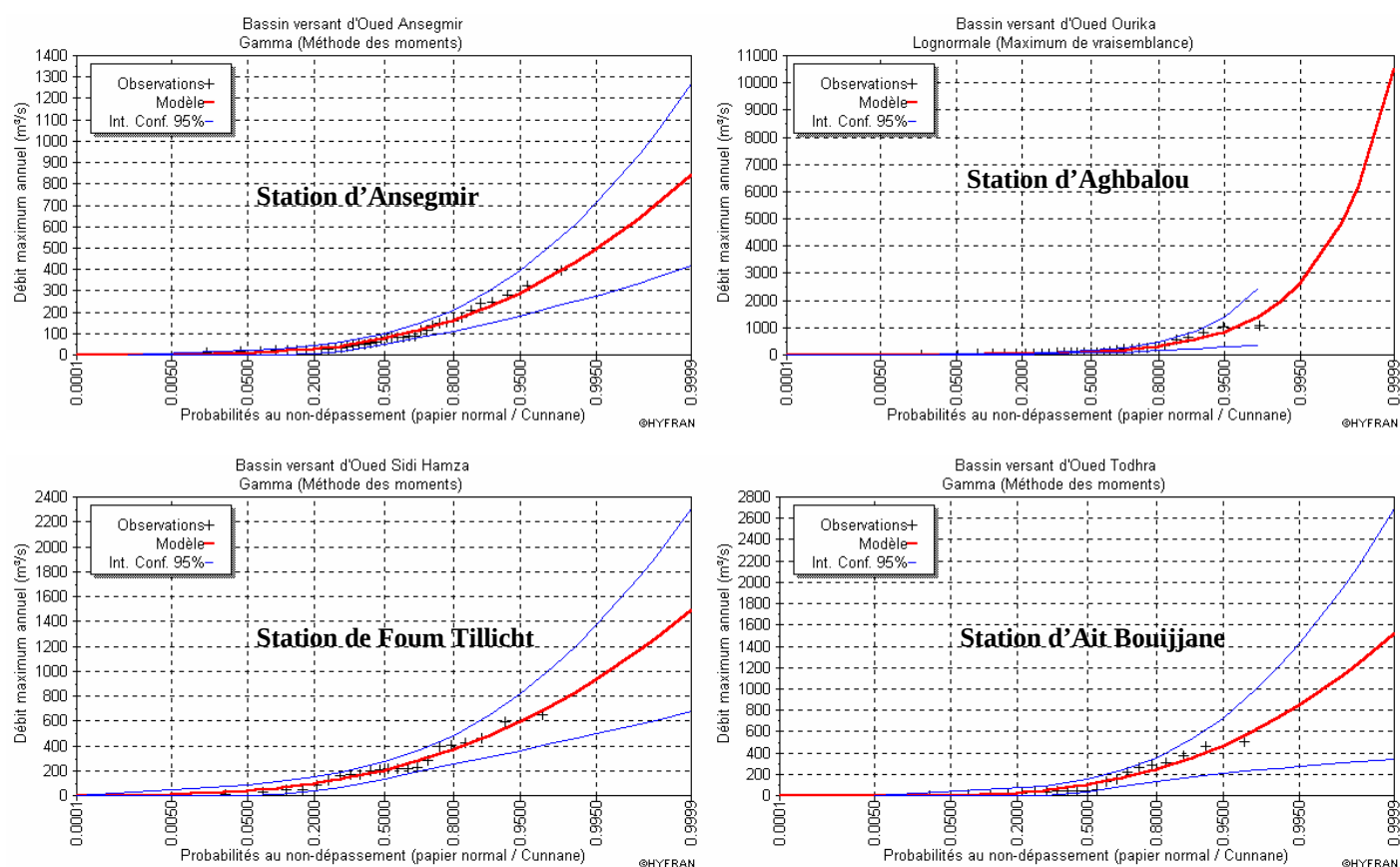


Fig. 24: Résultats des ajustements statistiques

Les bassins analysés s'ajustent mieux par la loi Gamma (Méthode des moments) à l'exception du bassin versant de l'oued Ourika qui s'ajuste à la loi Log Normale ce qui révèle l'irrégularité du régime de l'oued. Cette analyse fréquentielle nous a permis de déterminer les périodes de retour de crue qui est par ailleurs nécessaire pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques et leur protection en cas de crue.

III.4. Analyse corrélatrice et spectrale (ACS)

III.4.1. Introduction

Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques, leur fonctionnement et leur structure, on a appliqué les méthodes d'analyses corrélatrices et spectrales aux séries chronologiques des pluies et des débits. Ce sont des méthodes qui consistent à assimiler le système étudié à une "boîte noire" dont on ignore le contenu et à en étudier le contenu (analyse systémique). Ce type d'étude est donc une approche phénoménologique basée sur l'observation et l'expérience.

La finalité de cette analyse systémique réside dans la caractérisation du système par sa fonction de transfert ou par le mécanisme qui modifie l'entrée et la sortie par une relation de cause à effet. Cette fonction est la réponse impulsionnelle du système.

Ces méthodes s'inspirent directement des méthodes de traitement de signal développées par A. Mangin (1981, 1982, 1984 et 1988) au laboratoire souterrain de Moulis. Elles ont pour but d'extraire l'information contenue dans les chroniques de pluie et de débit représentant respectivement les fonctions d'entrée et de sortie du système hydrologique étudié.

L'analyse des séries chronologiques est réalisée soit dans le domaine temporel (analyse corrélatoire), soit dans le domaine fréquentiel (analyse spectrale). La structure des chroniques entrées et sorties est traitée soit séparément (analyses simples), soit l'une par rapport à l'autre (analyses croisées).

III.4.2. Principe de la méthode

III.4.2.1. Analyse simple

a) Corrélogramme simple

Le corrélogramme simple met en évidence la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grands. Par conséquent, il traduit la mémoire du système étudié (A. Mangin, 1984). En effet, plus un événement, pris à un instant donné, aura une influence à long terme plus lente sera la décroissance du corrélogramme.

Analytiquement, le corrélogramme simple correspond à la représentation graphique de la fonction d'autocorrélation d'une chronique obtenue par le calcul du coefficient d'autocorrélation r_k (Jenkins et Watts, 1968). C'est-à-dire la mesure de la corrélation d'une chronique avec elle-même décalée d'un pas de temps variant de 0 à m (troncature) selon un pas d'échantillonnage k . Il est alors possible de mettre en évidence toutes structures dans les données qui rendent compte des mécanismes intervenant dans la dynamique du système étudié fini (Fig. 25).

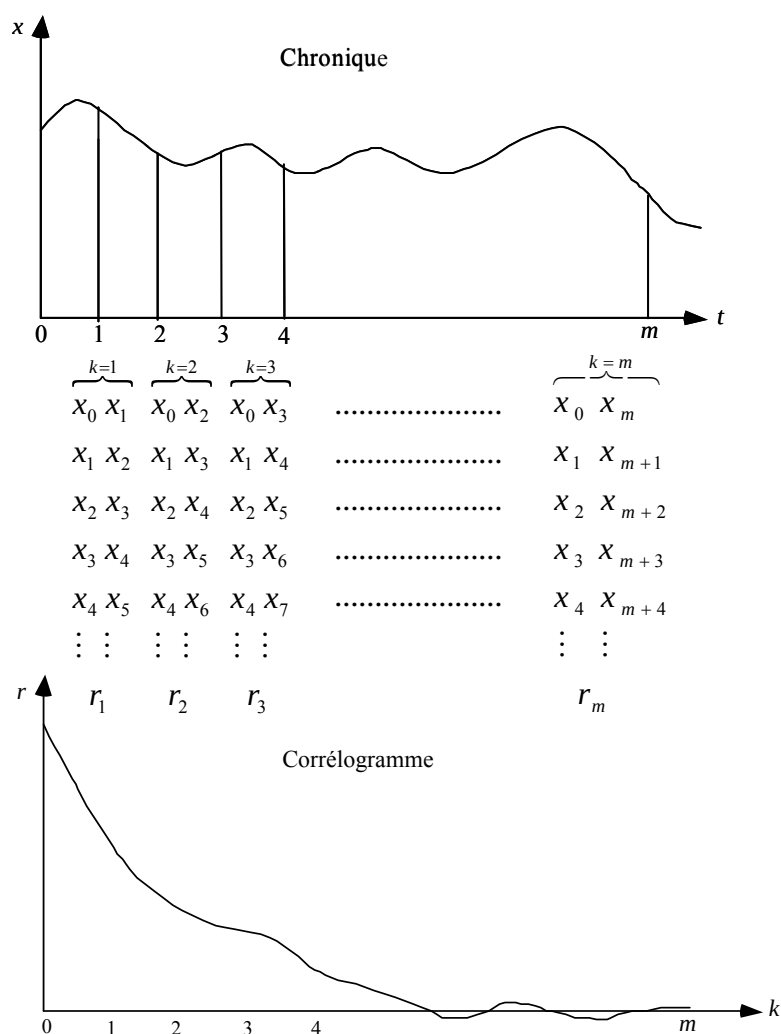


Fig. 25: Corrélogramme simple (A. Mangin., 1984)

$$r_k = \frac{C_k}{C_0} \quad (10)$$

$$C_k = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x}) \quad (11)$$

Avec :

$k = 0, 1, 2, \dots, m$

m est la troncature

n : longueur de la chronique (nombre d'observations)

$r_k = 1$ lorsque $k = 0$

x_i : processus étudié

$\bar{x}$: moyenne des x de la série chronologique.

Le choix de la fenêtre d'observation est fondé sur des principes semi-empiriques :

- * $m > \frac{n}{2}$, les résultats ne sont pas corrects,
- * $\frac{n}{3} < m < \frac{n}{2}$, les résultats sont légèrement faussés,
- * $m < \frac{n}{3}$, les résultats sont corrects.

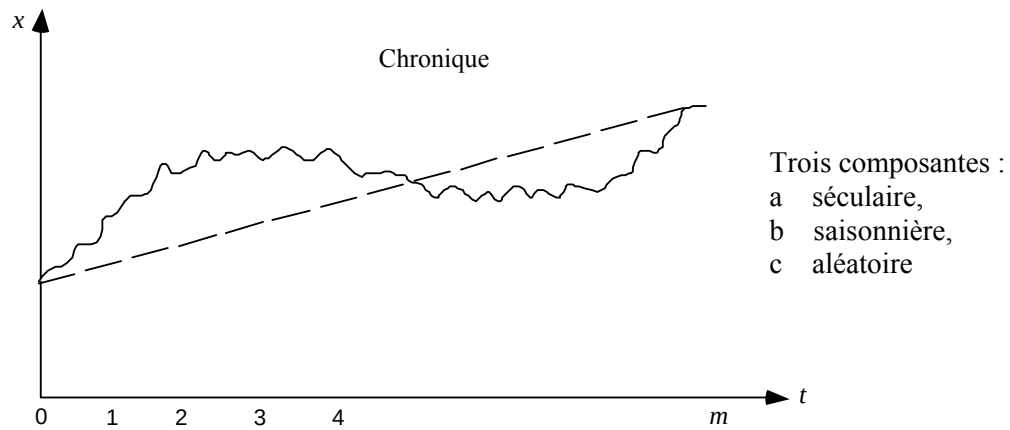
La troncature m (fenêtre d'observation) doit être inférieure à la moitié du nombre de valeur de la période d'étude et de préférence à $\frac{n}{3}$, où n est la longueur de la chronique (A. Mangin, 1984). En effet, m agit comme un filtre qui réduit l'influence des coïncidences dans le signal.

Lorsqu'un corrélogramme tend rapidement vers zéro, il caractérise une succession d'événements indépendants les uns des autres. Le phénomène ainsi analysé pourrait être considéré comme un processus quasi-aléatoire. Par contre, un corrélogramme qui décroît lentement indique un phénomène plus structuré donc un effet mémoire très important. Cet effet mémoire se traduit par la notion de réserve dans le cas des systèmes hydrologiques (A. Mangin, 1982).

En outre, un système hydrologique voit son pouvoir régulateur augmenter de l'amont vers l'aval. Les pertes de charges s'accroissent et la mémoire des événements est de plus en plus importante. Cela fournit des corrélogrammes de plus en plus étalés de l'amont vers l'aval du système.

b) Spectre simple

L'analyse spectrale permet de décomposer l'information par rapport aux fréquences. Elle correspond à la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation d'une fonction aléatoire stationnaire correspond à la densité spectrale énergétique de cette fonction (Max, 1980). Cette densité n'est autre que la répartition des variances suivant les fréquences (Ventsel, 1973 in A. Mangin 1984). Valable pour les fonctions aléatoires stationnaires, la notion du spectre a été étendue aux fonctions aléatoires non stationnaires (Levine, 1973) (Fig. 26).



$$\text{Var. totale} = \text{Var. a} + \text{Var. b} + \text{Var. c}$$

Décomposition de la variance totale dans le domaine fréquentiel
=
Transformée de Fourier du corrélogramme de la chronique

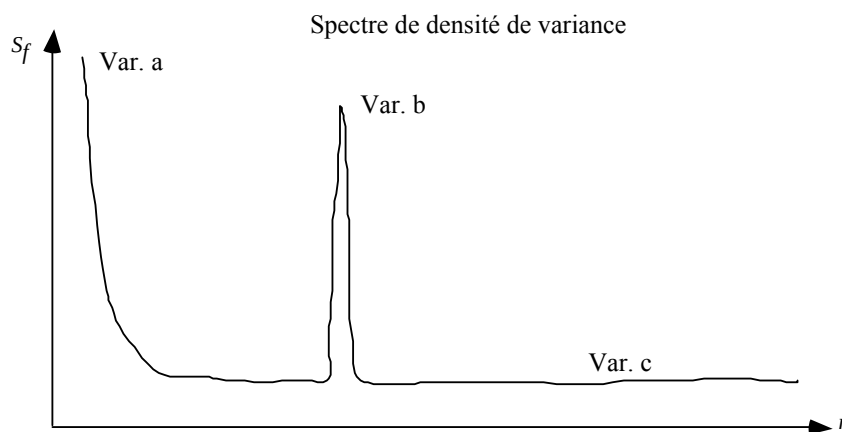


Fig. 26: Spectre de densité de variance (A. Mangin., 1984)

Une approche non biaisée de la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation est fournie par :

$$S_f = 2 \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{k=m} D_{(k)} r_{(k)} \cos 2\pi f_k \right) \quad (12)$$

où :

$k = 0, 1, 2, \dots, m$

f : fréquence considérée (si le pas choisi est, $f = j/2m$, $j = 0, 1, 2, 3, \dots, m$)

$r_{(k)}$: coefficient d'autocorrélation (corrélogramme)

$D_{(k)}$: fonction de pondération (ou filtre) nécessaire pour que la valeur estimée S_f soit non biaisée (ou filtrage de $r_{(k)}$ imposé par la transformée de Fourier.

De nombreuses fonctions de pondération D_k sont proposées dans la littérature. Celle de Tukey s'est révélée la mieux adaptée (A. Mangin, 1984).

Le spectre simple permet de mettre en évidence principalement les composantes périodiques du signal à long terme, séculaires, saisonnières et aléatoires, car elles apparaissent comme des pics caractéristiques d'une certaine fréquence. Ces tendances sont introduites au niveau de la fonction d'entrée (pluie). Le spectre permet donc d'apprécier la façon dont cette information est modifiée ou altérée voire éliminée par le système. Il permet aussi d'obtenir le temps de régulation du système c'est à dire la durée d'influence du signal d'entrée ; il traduit par conséquent l'inertie du système qui est liée directement aux réserves. Le temps de régulation correspond à la valeur du spectre pour une fréquence $F = 0$ divisé par 2.

Donc, le corrélogramme sera utilisé dans un premier temps pour détecter un phénomène structuré ou aléatoire du signal ; alors que le spectre de densité de variance fournira les périodes des phénomènes structurés.

III.4.2.2. Analyse croisée

Elle représente une fonction d'intercorrélation entre les fonctions d'entrée et de sortie du système, elle permet donc de comparer simultanément le signal d'entrée à celui de la sortie. Comme pour l'analyse simple, les outils sont le corrélogramme et le spectre.

a) Corrélogramme croisé

Il correspond à la corrélation entre une entrée et une sortie avec des décalages dans le temps. Pour l'estimation du coefficient de corrélation (r_{xy}) :

$$r_{+k} = r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{S_x \cdot S_y} \quad \text{avec } C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (14)$$

$$r_{-k} = r_{yx}(k) = \frac{C_{yx}(k)}{S_x \cdot S_y} \quad \text{avec } C_{yx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (y_i - \bar{y})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (15)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{et} \quad S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (16)$$

Si la fonction d'entrée présente un caractère quasi-aléatoire et invariant, le corrélogramme croisé correspond à la réponse impulsionnelle du système, donc à l'hydrogramme unitaire (A. Mangin, 1981). L'image de l'hydrogramme unitaire ainsi obtenu permet néanmoins de renseigner sur la modulation par le système de l'impulsion d'entrée. Plus le système module l'impulsion d'entrée, plus le corrélogramme croisé est aplati. A l'opposé, un hydrogramme pointu et peu étalé caractérise un système modifiant très peu l'impulsion d'entrée. Ce système est très bien drainé et ne possède que peu de réserve.

Si le signal d'entrée est structuré, alors le corrélogramme croisé fera apparaître les périodicités.

Si le corrélogramme croisé est symétrique, alors les processus choisis comme étant les entrées et les sorties peuvent être reliés par une même cause.

b) Spectre croisé

Il correspond à la décomposition de la covariance entre les entrées et les sorties dans le domaine fréquentiel. C'est la transformée de Fourier du corrélogramme croisé. Le corrélogramme croisé n'étant pas symétrique pour les valeurs de -k et de +k, le spectre est exprimé par un nombre complexe.

D'où deux expressions :

* spectre croisé = cospectre $\{k_{xy}(f)\}$ - spectre de quadrature $\{iq_{xy}(f)\}$

$$S_c(f) = k_{xy}(f) - iq_{xy}(f) \quad (17)$$

Il est défini par les relations suivantes :

$$k_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_1^m \{r_{xy}(k) + r_{yx}(k)\} D(k) \cdot \cos 2\pi f k \right] \quad (18)$$

$$q_{xy}(f) = 2 \sum [r_{xy}(k) - r_{yx}(k)] D(k) \cdot \sin 2\pi f k \quad (19)$$

* spectre croisé = fonction d'amplitude $\{|S_{xy}(f)|\}$ * fonction de phase $\{\exp[-i\theta_{xy}(f)]\}$

$$S_{c(f)} = |S_{xy}(f)| \cdot \exp[-i\theta_{xy}(f)] \quad (20)$$

Il est défini donc par deux fonctions :

- Fonction d'amplitude : $|S_{xy}(f)|$
- Fonction de phase : $\theta_{xy}(f)$

➤ Fonction d'amplitude

La fonction d'amplitude représente la variation de la covariance entrée-sortie pour différentes fréquences. Elle exprime la façon dont le signal entrée-sortie a été modifié par le système (Fig. 27).

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{k_{xy}^2(f) + q_{xy}^2(f)} \quad (21)$$

Si $|S_{xy}(f)| = 0$ alors aucune information en provenance de la fonction d'entrée n'est décelée à la sortie et par conséquent l'interprétation des autres fonctions (fonction de phase, de cohérence et de gain) n'est plus significative.

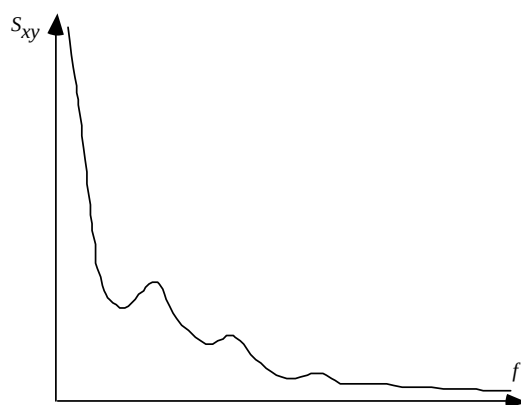


Fig. 27: Fonction d'amplitude

➤ Fonction de phase

La fonction de phase exprime le déphasage entrée-sortie pour chaque fréquence (Fig. 28).

$$\theta_{xy}(f) = \arctan g \left(\frac{q_{xy}^2(f)}{k_{xy}^2(f)} \right) \quad (22)$$

Le déphasage en jours est calculé à partir de la formule suivante :

$$\tau = \theta / 2\pi f \quad (23)$$

Où :

τ : le déphasage entrée-sortie en jour

θ : valeur du spectre (valeur de la fonction de phase pour la fréquence de coupure)

f : fréquence de coupure.

Dans le calcul, la fréquence f doit être définie dans le domaine fréquentiel où la relation entrée-sortie est significative, domaine qui est exprimé par la fonction d'amplitude.

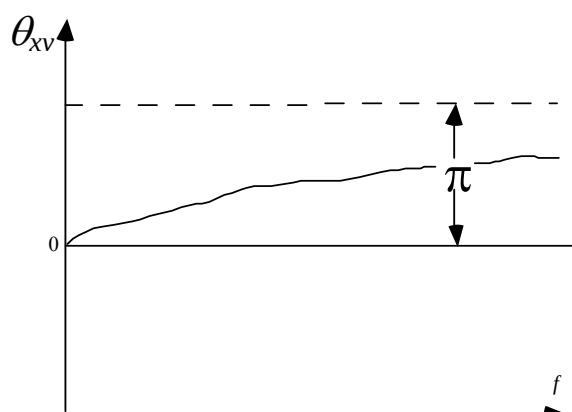


Fig. 28: Fonction de phase

c) Fonction de cohérence

La fonction de cohérence nous renseigne sur la linéarité du système. Elle est assimilée à une intercorrélacion entre les événements à l'entrée et à la sortie du système dans le domaine fréquentiel (Fig. 29). Dans le cas d'un système non linéaire, les sorties ne sont pas proportionnelles aux entrées, le coefficient de cohérence sera inférieur à 1.

Elle est définie donc par la formule suivante :

$$C_{xy}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{\sqrt{S_x(f) \cdot S_y(f)}} \quad (24)$$

Cette fonction exprime la liaison entrée-sortie ainsi que la linéarité de cette relation. En hydrologie, une bonne linéarité d'un système hydrologique est expliquée par le fait qu'une forte pluie engendre une forte crue, à l'inverse d'un système non linéaire où une forte pluie ne se manifeste pas par une forte crue mais par une importante mise en réserve.

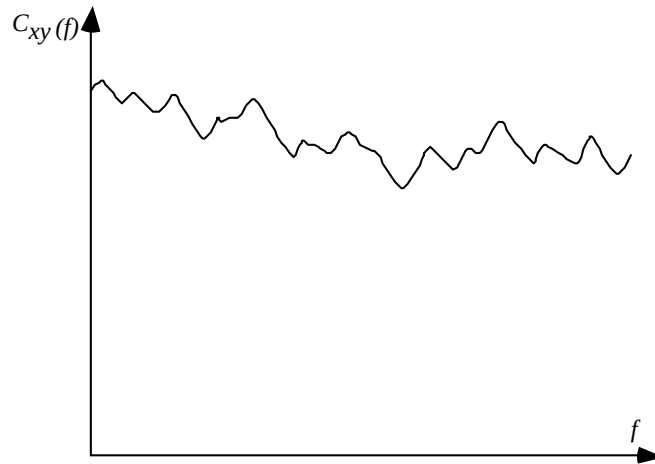


Fig. 29 : Fonction de cohérence

d) Fonction de gain

Elle exprime les variations du coefficient de régression (variance d'entrée / variance de sortie) en fonction des fréquences. De ce fait, elle indique comment le signal d'entrée est amplifié ou atténué par le système. Elle fournit donc une estimation de l'amplification ou de l'atténuation du signal d'entrée (Fig. 30). C'est ainsi qu'au niveau des systèmes hydrologiques, le gain inférieur à 1 (atténuation) pour les hautes et moyennes fréquences correspond à une mise en réserve lors des crues. Le gain supérieur à 1 (amplification) pour les basses fréquences implique un déstockage des réserves en eau souterraine.

$$g_{xy}(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_x(f)} \quad (25)$$

Si $g_{xy}(f) > 1$ le signal d'entrée est amplifié par le système (déstockage)

Si $g_{xy}(f) < 1$ le signal d'entrée est atténué par le système (stockage).

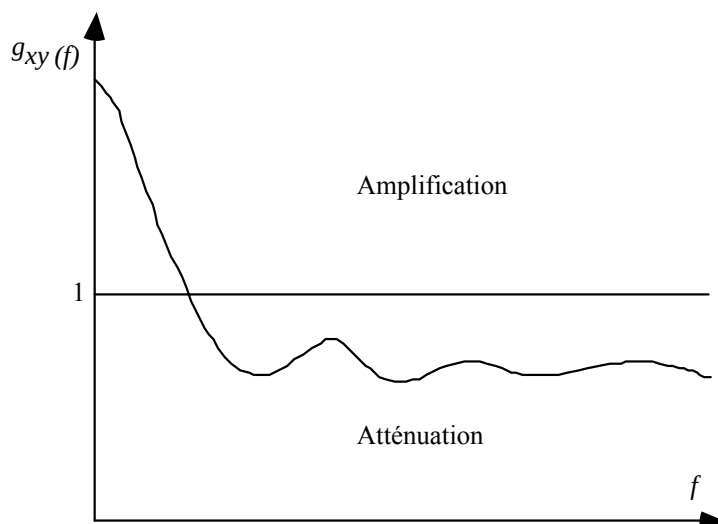


Fig. 30 : Fonction de gain

III.4.3. Application à des bassins versants pilotes représentatifs

La méthode d'analyse corrélatoire et spectrale a été appliquée à des systèmes hydrologiques de surface (oueds ou bassins versants) situés dans des contextes différents. L'analyse de ces systèmes est basée sur les données moyennes journalières des pluies et des débits enregistrées aux niveaux des stations hydrométriques pour une longue période d'enregistrement. L'analyse a été faite d'abord à court terme dont le pas d'échantillonnage est de 1 jour et la limite supérieure fixée à 125 jours, ce qui permet de mieux tenir compte du détail. Puis, à long terme dont il est proposé de prendre pour borne supérieure de la fenêtre d'observation 1250 jours avec un pas d'échantillonnage limité à 10 jours, pour la mise en évidence des cycles annuels.

III.4.3.1. Bassin versant de la Moulouya

➤ Oued Ansegmir à la station d'Ansegmir :

a) Analyse du signal d'entrée (Pluies)

L'analyse à court terme (fenêtre d'observation de 1 à 125 jours) des pluies de l'oued Ansegmir à la station d'Ansegmir se traduit par un corrélogramme qui décroît très rapidement et prend la valeur 0.2 au 1^{er} jour puis devient nul au 16^{ème} jour. L'effet mémoire est donc faible. La pluie ne présente pas de structure nette. Elle a un caractère quasi-aléatoire. Le corrélogramme de la pluie ne montre aucune variation cyclique. L'absence du cycle annuel de la pluie provient du fait que la période pluvieuse n'est pas synchrone d'un cycle à l'autre (Théorème d'échantillonnage de Shannon). Le spectre de densité de variance présente des pics de faible amplitude que ce soit pour les basses fréquences ou les hautes fréquences (Fig. 31).

A long terme (fenêtre d'observation de 10 à 1250 jours), le corrélogramme ne montre aucune variation. Cependant le spectre de densité de variance montre que la pluie n'est pas tout à fait monotone. Une légère tendance qui correspond à la variation annuelle apparaît dans le spectre qui montre un pic de 312.5 jours de période à une fréquence de 0.032 j^{-1} (Fig. 32).

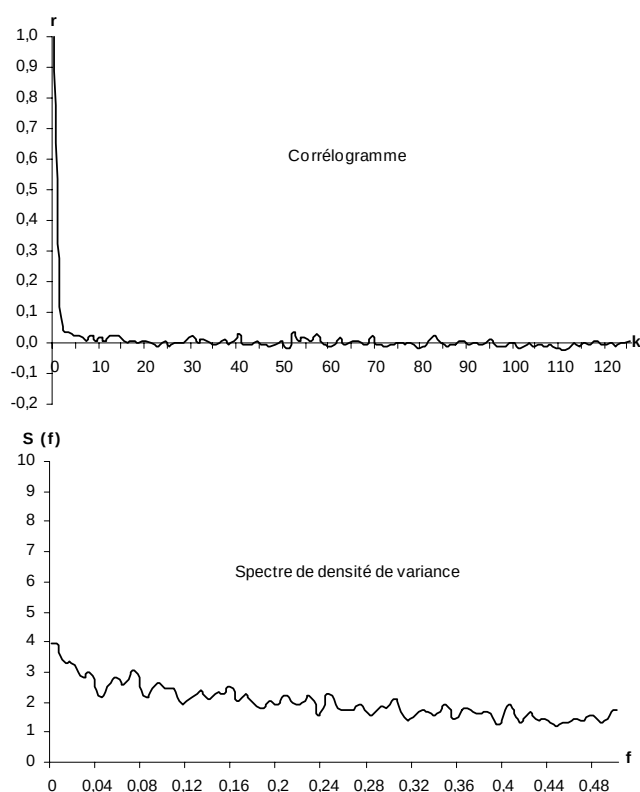


Fig. 31: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994 ($m = 125$ jours)

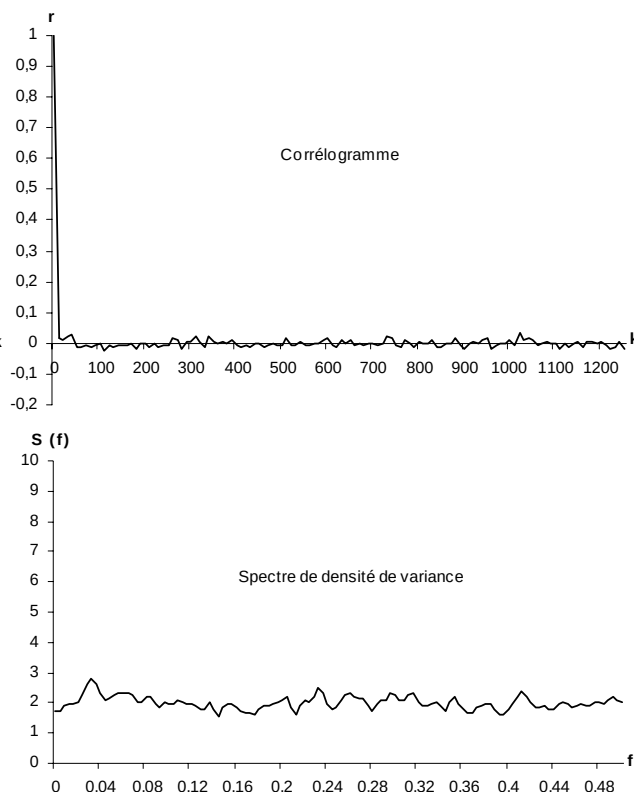


Fig. 32: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994 ($m = 1250$ jours)

b) Analyse du signal de sortie (Débits)

A court terme (fenêtre d'observation de 1 à 125 jours), le corrélogramme des débits décroît lentement et de façon monotone et il n'atteint la valeur 0.2 qu'au bout du 57^{ème} jour (Fig. 33). La dépendance des événements entre eux est donc très forte. Le système présente un effet mémoire considérable, ce qui traduit l'importance des réserves du système étudié. Le spectre de densité de variance ne présente aucun pic notable. L'analyse du spectre simple met en évidence une bande spectrale large avec une fréquence de coupure $F_c = 0.432$ par jour et un temps de régulation de 49.5 jours, ce qui traduit une inertie plus importante.

L'analyse à long terme montre que le corrélogramme traduit l'existence d'un cycle annuel (r_k pour 365 jours est de 0,236) qui est peu visible dans le corrélogramme de la pluie, son importance est lié à celle des réserves. Le spectre montre des variations périodiques représentées par trois pics dont deux sont importants. Le pic de plus forte amplitude est centré sur 357 jours (cycle annuel), le deuxième d'amplitude moyenne est centré sur 192 jours et le troisième de faible importance centré sur 125 jours (Fig. 34). C'est en effet pervers dû au fait que la saison des pluies arrive brutalement, le signal pluie est donc discontinu et dans ce cas le passage à la transformée de Fourier apparaît en début de spectre.

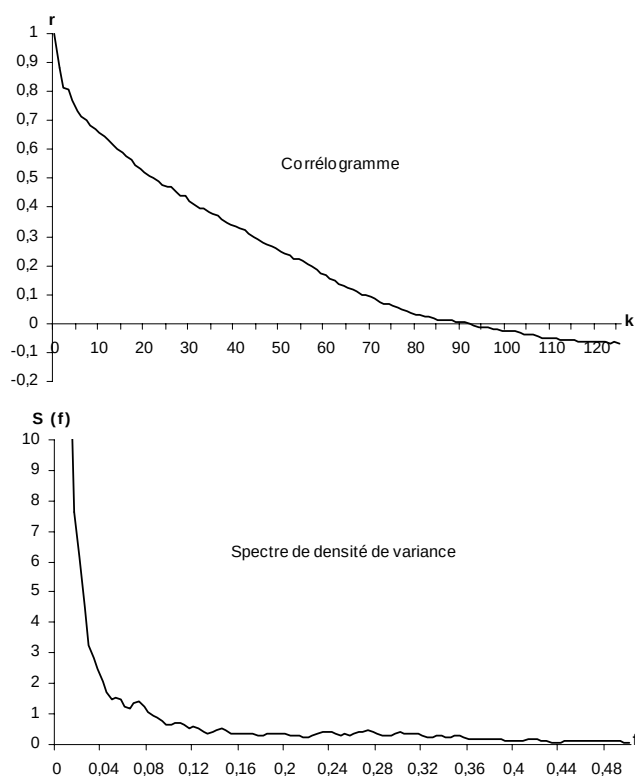


Fig. 33: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994
($m = 125$ jours)

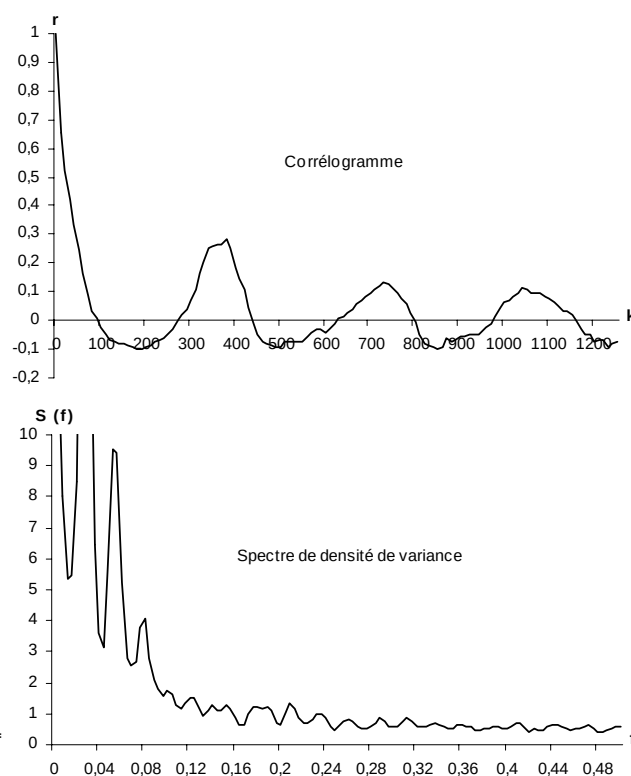


Fig. 34: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994
($m = 1250$ jours)

c) Analyse croisée

L'analyse croisée permet d'étudier la relation pluie-débit. Elle a été effectuée entre les pluies et les débits moyens journaliers enregistrés à la station d'Ansegmir. Le corrélogramme croisé fournit une assez bonne image de la réponse impulsionnelle, donc de l'hydrogramme unitaire. Il est très complexe. Il présente une allure pointue qui caractérise le système à faible pouvoir régulateur possédant un réseau de drainage bien développé. La forme pointue correspond à des mécanismes de ruissellement de surface rapide. La décroissance témoigne de l'importance des réserves du système étudié. On note plusieurs ruptures de pente lors de la décroissance qui traduisent des retards dans les apports de l'oued. La décroissance indique la présence de plusieurs pics lors de la décrue (Fig. 35).

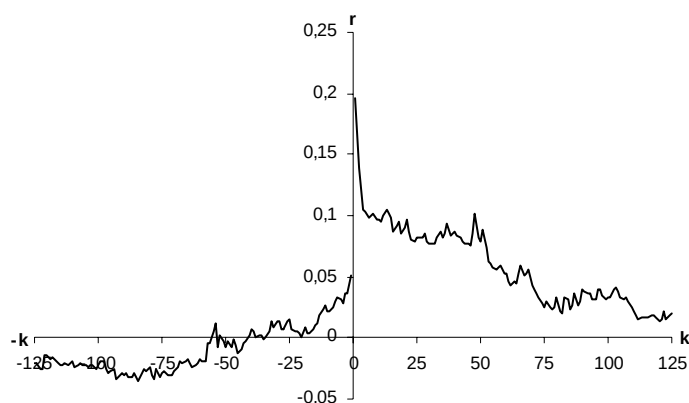


Fig. 35: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994

- Fonctions de cohérence et de gain

La fonction de cohérence exprime la linéarité de la relation entre pluie-débit. Pour la station d'Ansegnir, la linéarité est généralement peu importante. Ceci est normal à cause des réserves en eau. A une forte pluie ne correspond pas forcément une forte crue mais une forte mise en réserve. Elle est très mauvaise pour les moyennes et les hautes fréquences. Ces résultats montrent donc que le système ne présente pas un fonctionnement linéaire à court terme (Fig. 36).

La fonction de gain donne une estimation de l'amplification ou de l'atténuation du signal d'entrée, donc de la façon dont la pluie est mise en réserve. Pour la station d'Ansegnir, la fonction de gain se dégrade très rapidement. L'amplification n'est observée que pour les très basses fréquences (0 et 0.016). Pour les fréquences supérieures à 0.016 ; le signal d'entrée est complètement atténué, ce qui traduit un stockage pendant les périodes pluvieuses (Fig. 37).

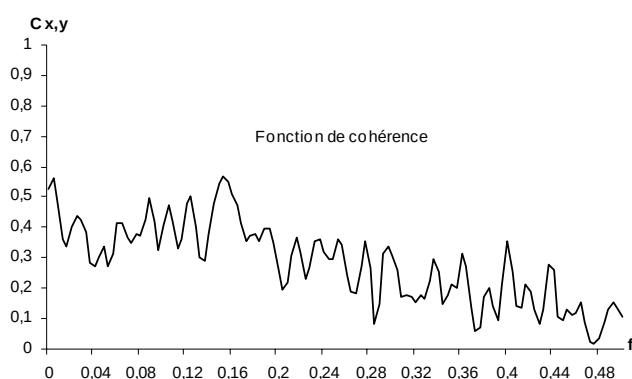


Fig. 36: Fonction de cohérence de la station d'Ansegnir pour la période de 1973 à 1994

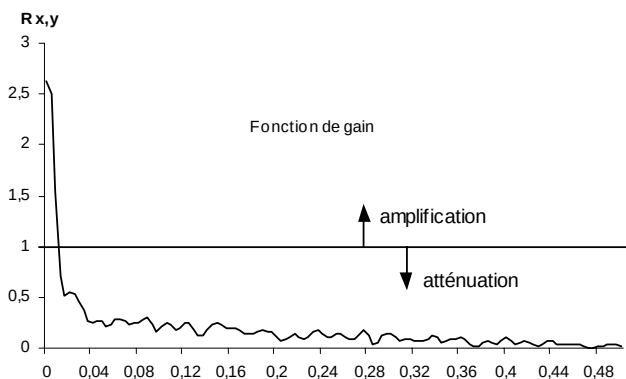


Fig. 37: Fonction de gain de la station d'Ansegnir pour la période de 1973 à 1994

III.4.3.2. Bassin versant de Tensift

➤ Oued Ourika à la station d'Aghbalou :

a) Analyse du signal d'entrée (Pluies)

Les résultats de l'analyse à court terme (fenêtre d'observation de 1 à 125 jours) montrent que le corrélogramme des pluies décroît rapidement et atteint la valeur de 0.2 dès le 1^{er} jour. Le fait que le corrélogramme continue à décroître, est lié à un effet saisonnier. Le spectre de densité de variance est pratiquement monotone avec quelques pics très proches du bruit de fond. Ceci laisse supposer la présence de périodicités (Fig. 38).

A long terme (fenêtre d'observation de 10 à 1250 jours), le corrélogramme est représenté par une fonction presque constante de valeur nulle. Le cycle annuel est bien marqué. Le spectre présente des pics de faible amplitude, le plus important dépasse $S(f) = 4$ et qui correspond au cycle annuel de 365 jours (Fig. 39).

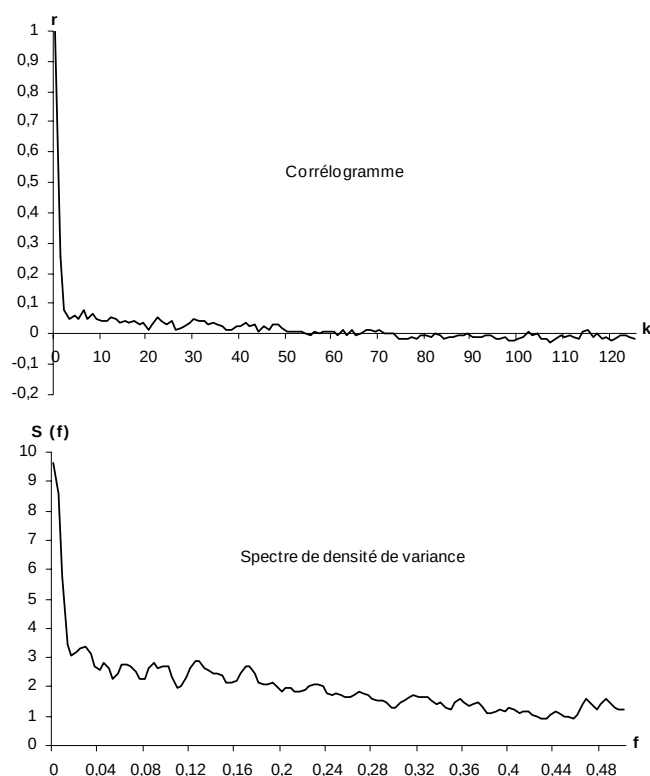


Fig. 38: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996 ($m = 125$ jours)

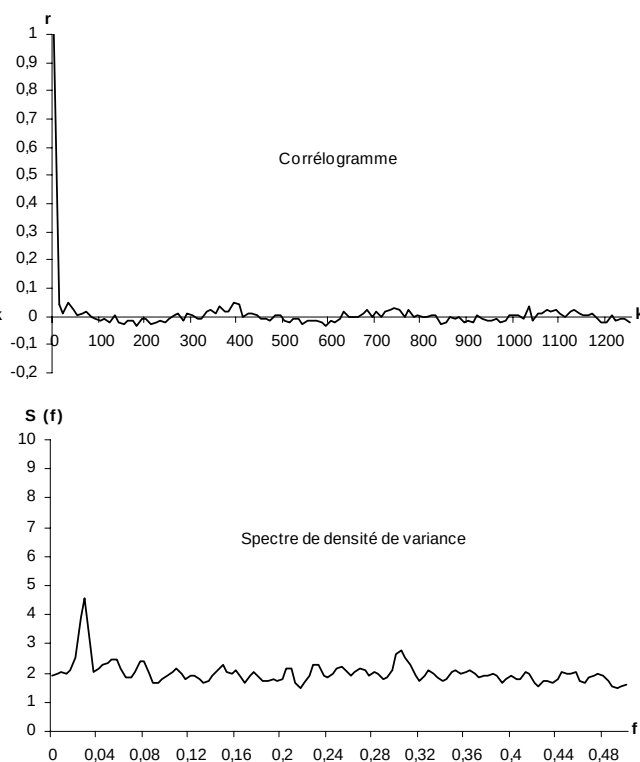


Fig. 39: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996 ($m = 1250$ jours)

b) Analyse du signal de sortie (Débits)

A court terme, le corrélogramme décroît très lentement, la valeur 0.2 est atteinte au 52^{ème} jour. L'effet mémoire est donc très élevé, ce qui traduit un stockage d'un certain volume d'eau au moment des épisodes pluvieux, le déstockage apparaissant beaucoup plus tard. Cet effet est par conséquent lié à l'importance des réserves du système. Le spectre de densité de variance montre que l'effet mémoire correspond à un filtrage des hautes fréquences au profit des basses fréquences. Le temps de régulation est de 46.5 jours. La fréquence de coupure F_c est 0.472 j^{-1} ; la bande spectrale est donc très large. Par conséquent, le système modifie très peu les informations contenues dans le signal d'entrée (Fig. 40).

L'analyse à long terme des débits montre sur le corrélogramme des variations cycliques. Cela correspond à un cycle annuel. Le spectre montre plusieurs pics qui n'étaient pratiquement pas visibles dans l'analyse à court terme. Le pic annuel à 0.028 j^{-1} (357 jours) est dominant. C'est le cycle annuel avec un pas de 125 jours (Théorème de Shannon) (Fig. 41).

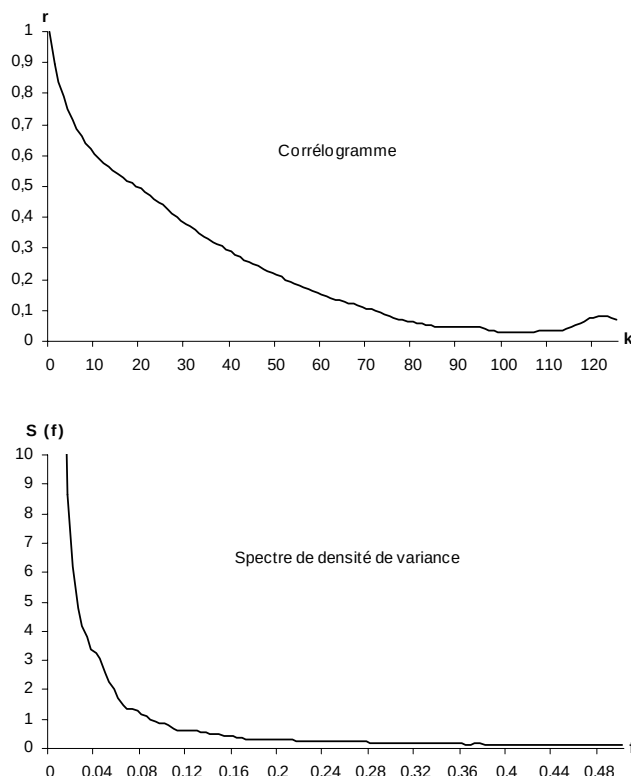


Fig. 40: Analyse de la chronique des débits à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996
($m = 125$ jours)

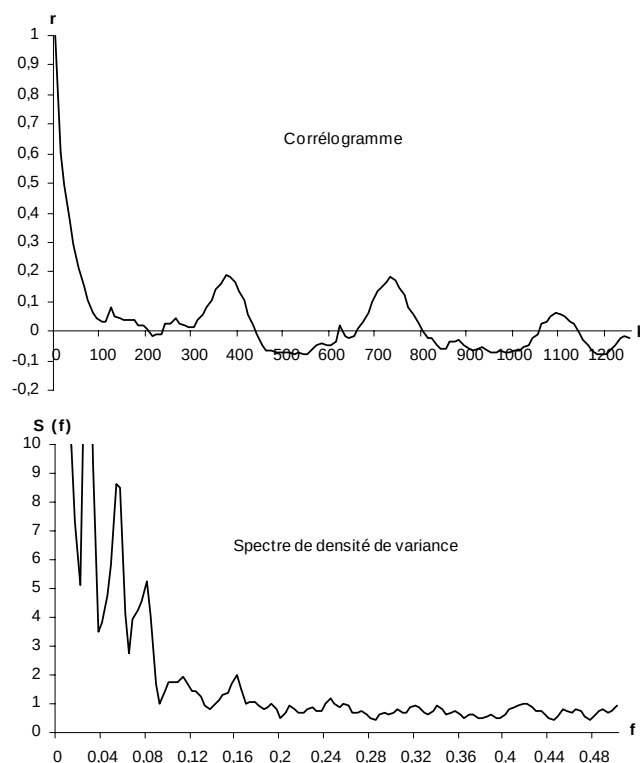


Fig. 41: Analyse de la chronique des débits à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996
($m = 1250$ jours)

c) Analyse croisée

L'analyse croisée a été effectuée entre les pluies et les débits enregistrés au niveau de la station d'Aghbalou. Le corrélogramme croisé présente une réponse faible mais étalée. C'est la caractéristique d'un système dont les variations des réserves évoluent lentement. Il ne fournit pas de réponse impulsionnelle importante (Fig. 42).

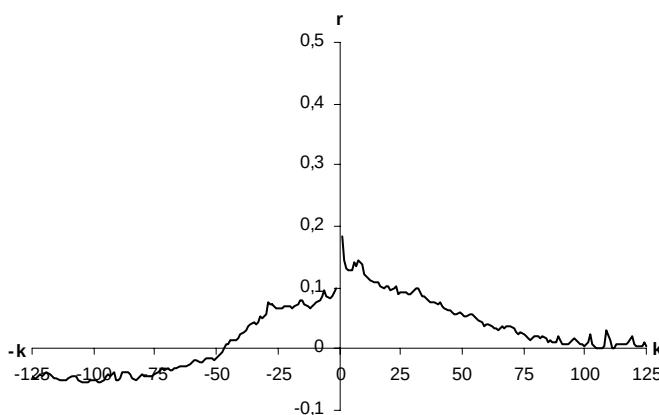


Fig. 42: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996

- Fonctions de cohérence et de gain

La fonction de cohérence est très mauvaise pour les basses et les hautes fréquences. La linéarité pluie-débit est donc médiocre. Ce qui traduit un système complexe (Fig. 43). En ce qui concerne le gain, on constate une amplification très importante du signal pluie pour les basses fréquences (saison, année) et une atténuation considérable et très rapide pour les hautes fréquences (semaine, jour) (Fig. 44).

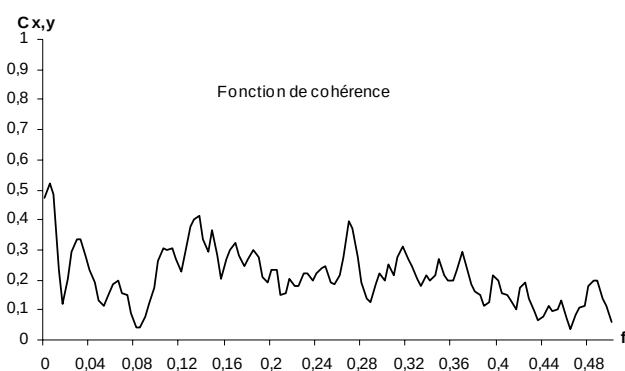


Fig. 43: Fonction de cohérence de la station d'Aghbalou pour la période de 1975 à 1996

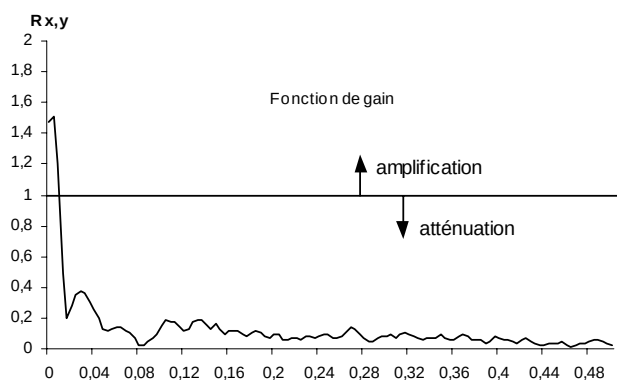


Fig. 44: Fonction de gain de la station d'Aghbalou pour la période de 1975 à 1996

III.4.3.3. Bassin versant de Ziz-Rhérès

➤ Oued Sidi Hamza à la station de Foum Tilicht :

a) Analyse du signal d'entrée (Pluies)

L'analyse à court terme des pluies de l'oued Sidi Hamza à la station de Foum Tilicht (fenêtre d'observation de 1 à 125 jours) se traduit par un corrélogramme simple qui atteint la valeur 0.2 au 1^{er} jour. Donc, l'effet mémoire est faible. Le spectre de densité de variance présente des pics de faible amplitude dont un dépassant légèrement la valeur 4 et qui correspond à une légère tendance de 125 jours de période (Fig. 45).

A long terme (fenêtre d'observation de 10 à 1250 jours), le corrélogramme des pluies est représenté par une fonction constante de valeur presque nulle. Le cycle annuel n'est pas marqué, donc aucune périodicité n'est décelable. Le spectre de densité de variance ne montre aucun pic important que ce soit pour les basses ou les hautes fréquences (Fig. 46). On peut considérer que la pluie dans cette région présente un caractère quasi-aléatoire.

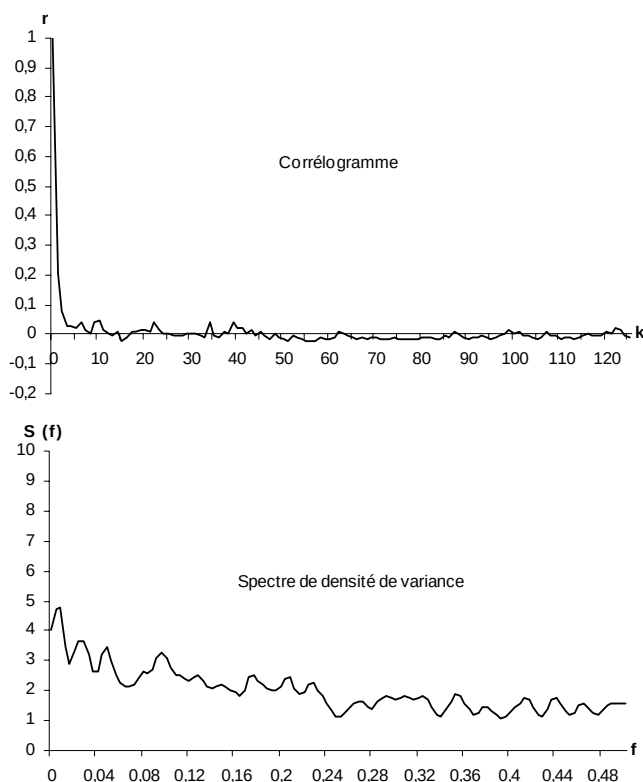


Fig. 45: Analyse de la chronique des pluies à la station de Fouta Djallon du 01/09/1975 au 31/08/1994 ($m = 125$ jours)

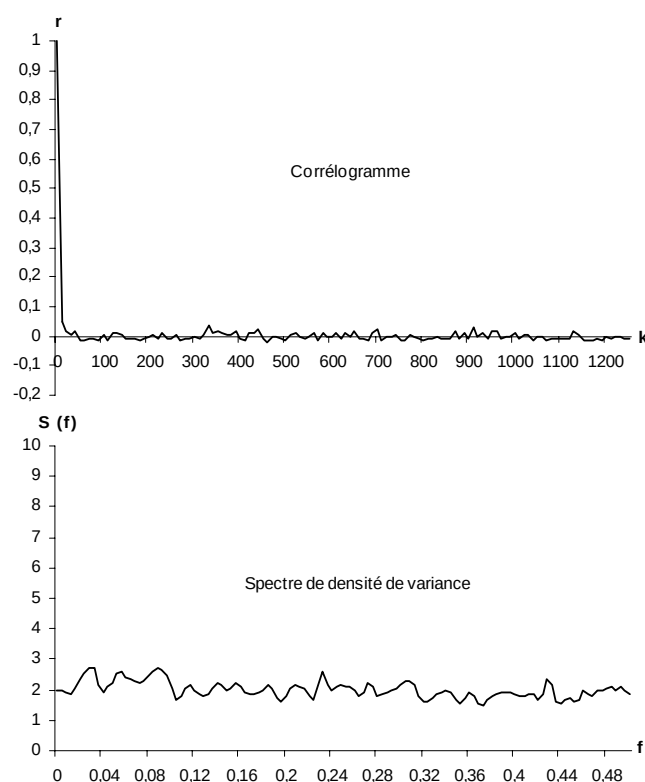


Fig. 46: Analyse de la chronique des pluies à la station de Fouta Djallon du 01/09/1975 au 31/08/1994 ($m = 1250$ jours)

b) Analyse du signal de sortie (Débits)

A court terme (Fenêtre d'observation de 1 à 125 jours), le corrélogramme met en évidence une décroissance lente, il atteint la valeur 0.2 au 25^{ème} jour. Ceci traduit une dépendance des événements entre eux et un effet mémoire important. Il ne montre par ailleurs aucune périodicité même annuelle. L'analyse du spectre simple met en évidence une tendance saisonnière, une bande spectrale large avec une fréquence de coupure $F_c = 0.04 \text{ j}^{-1}$ et un temps de régulation de 24.5 jours, ce qui traduit une inertie plus importante du système (Fig. 47).

A long terme (fenêtre d'observation de 10 à 1250 jours), le corrélogramme montre une variation. Cependant, le spectre indique une périodicité annuelle d'environ 365 jours. L'apparition de cette périodicité annuelle dans la chronique des débits est très nette, alors quelle est absente dans celle des pluies. Ceci est lié aux caractéristiques hydrodynamiques du système étudié. L'analyse des données pluviométriques a montré que les périodes pluvieuses ne sont pas toujours situées à la même époque d'une année à l'autre (Fig. 48).

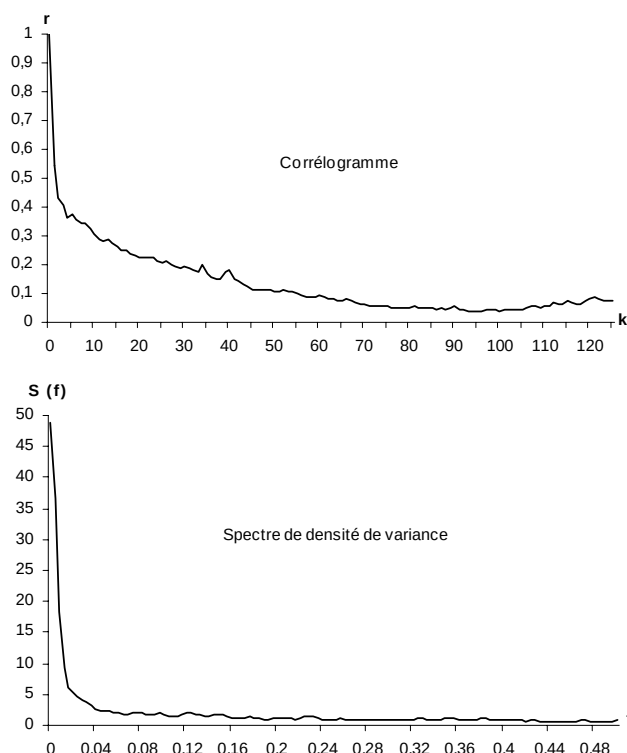


Fig. 47: Analyse de la chronique des débits à la station de Foug Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994 ($m = 125$ jours)

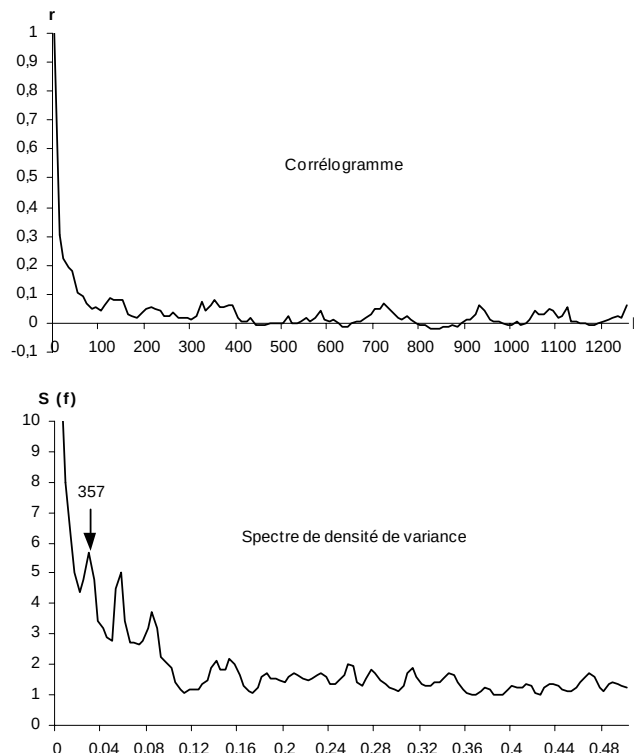


Fig. 48: Analyse de la chronique des débits à la station de Foug Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994 ($m = 1250$ jours)

c) Analyse croisée

La forme de corrélogramme croisé montre une partie de l'hydrogramme peu étalée pour les valeurs de $r < 0,1$ et une partie pour les valeurs de $r > 0,1$ où l'hydrogramme croît puis décroît rapidement. Ceci explique la réponse impulsionnelle du système. Par conséquent, le système de l'oued Sidi Hamza est le siège d'un écoulement de surface rapide (hydrogramme pointu) possédant un pouvoir régulateur faible, auquel s'ajoute un écoulement souterrain (hydrogramme relativement étalé) avec un pouvoir régulateur relativement important. A long terme, il montre des périodicités annuelles (Fig. 49).

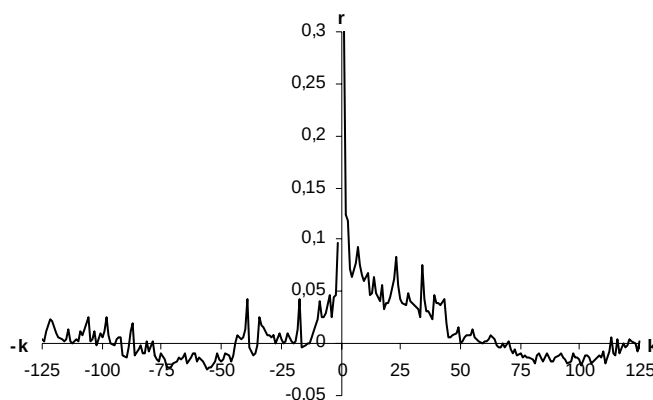


Fig. 49: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station de Foug Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994

- Fonctions de cohérence et de gain

La fonction de cohérence exprime la linéarité de la relation pluie-débit. Cette linéarité du système n'est pas bonne (Fig. 50). Elle varie autour de la valeur 0,5 qui correspond au coefficient de corrélation entre les événements puis elle décroît sensiblement à hautes fréquences.

La fonction de gain est une bonne image du caractère régulateur du système étudié. Elle montre que pour les basses fréquences, le signal amplifie peu le signal d'entrée, ce qui correspond à une mise en réserve lors des crues (effet à court terme). Une atténuation apparaît pour les moyennes et les hautes fréquences (Fig. 51). Cette atténuation s'explique par le stockage d'un certain volume d'eau au moment des épisodes pluvieux.

Le système de l'oued Sidi Hamza dispose d'une certaine réserve qui lui permet de régulariser son régime en période des basses eaux.

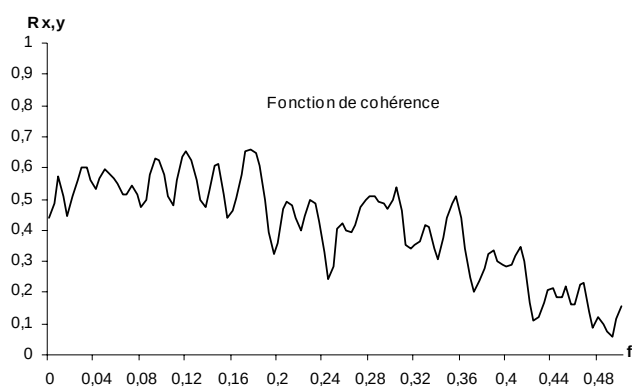


Fig. 50: Fonction de cohérence à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994

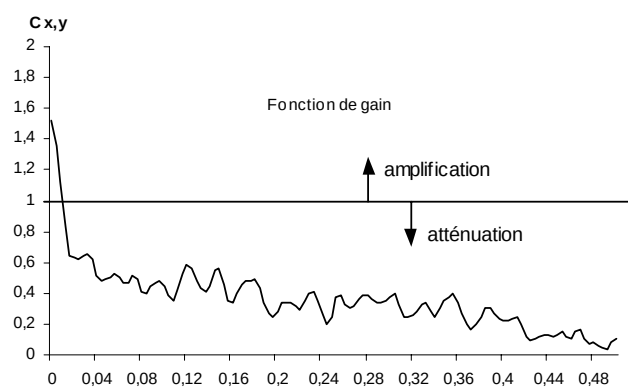


Fig. 51: Fonction de gain à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994

➤ Oued Todrha à la station d'Ait Bouijjane :

a) Analyse du signal d'entrée (Pluies)

A court terme (fenêtre d'observation de 1 à 125 jours), le corrélogramme de pluie décroît très rapidement, il prend la valeur 0.2 dès le 1^{er} jour. Donc, il traduit un caractère quasi-aléatoire. Le spectre de densité de variance présente des pics de faible amplitude (Fig. 52). Le fait que le spectre vers les basses fréquences (0) tend à remonter, traduit un net effet saisonnier de la pluie que la fenêtre ne prend pas (Théorème d'échantillonnage de Shannon).

A long terme (fenêtre d'observation de 10 à 1250 jours), l'analyse réalisée n'indique aucune périodicité même annuelle, par contre le court terme dénote un effet saisonnier. Ce point s'explique par le fait que la saison des pluies arrive à des dates variables avec un caractère aléatoire à long terme. Par conséquent, la pluie présente un caractère quasi- aléatoire (Fig. 53).

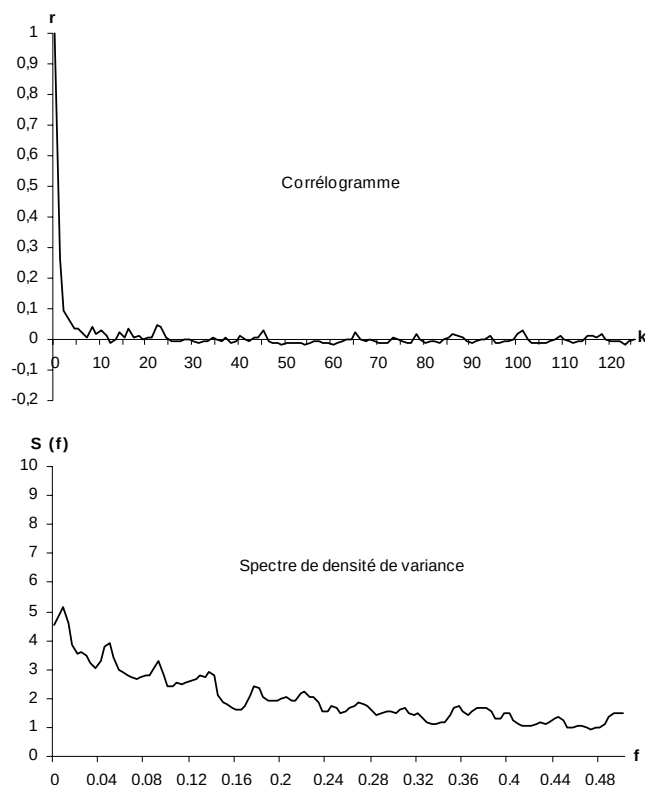


Fig. 52: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ait Bouijane du 01/09/1973 au 31/08/1994 ($m = 125$ jours)

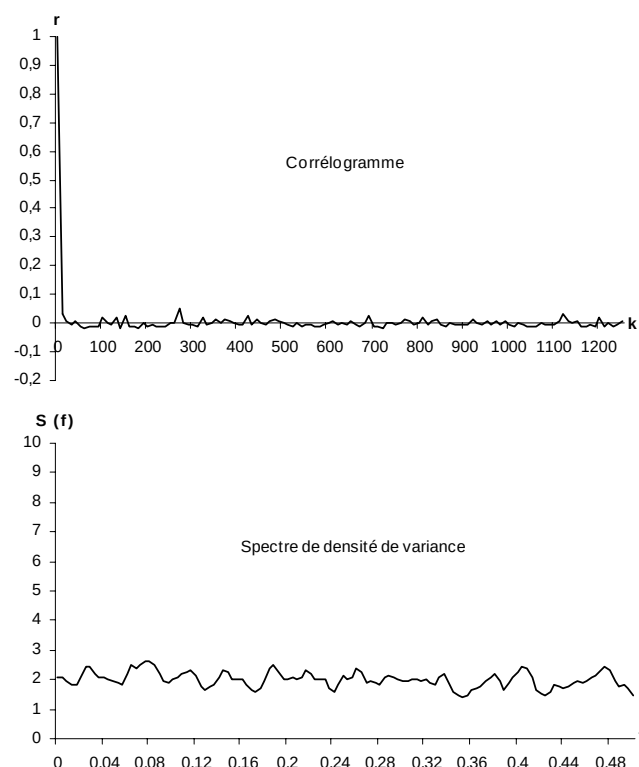


Fig. 53: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ait Bouijane du 01/09/1973 au 31/08/1994 ($m = 1250$ jours)

b) Analyse du signal de sortie (Débits)

A court terme, le corrélogramme décroît très rapidement et il atteint la valeur 0,2 au bout du 1^{er} jour. Ce qui traduit un système très peu inertiel avec un effet mémoire très faible. Le spectre de densité de variance confirme ce résultat et ne montre aucune tendance. La durée de l'influence de la pluie, représentée par le temps de régulation du système est de 11.5 jours, met en évidence alors la relative inertie du système. La fréquence de coupure F_c est de 0.292 j^{-1} ; avec une bande spectrale large, c'est à dire que l'information contenue dans le signal d'entrée est peu modifié par le système (Fig. 54).

A long terme, une décroissance très rapide du corrélogramme traduit un effet mémoire faible et une mise en réserve souterraine nulle. Le spectre ne montre aucun pic traduisant des composantes périodiques. Le spectre de densité de variance est assimilable à un bruit de fond (Fig. 55).

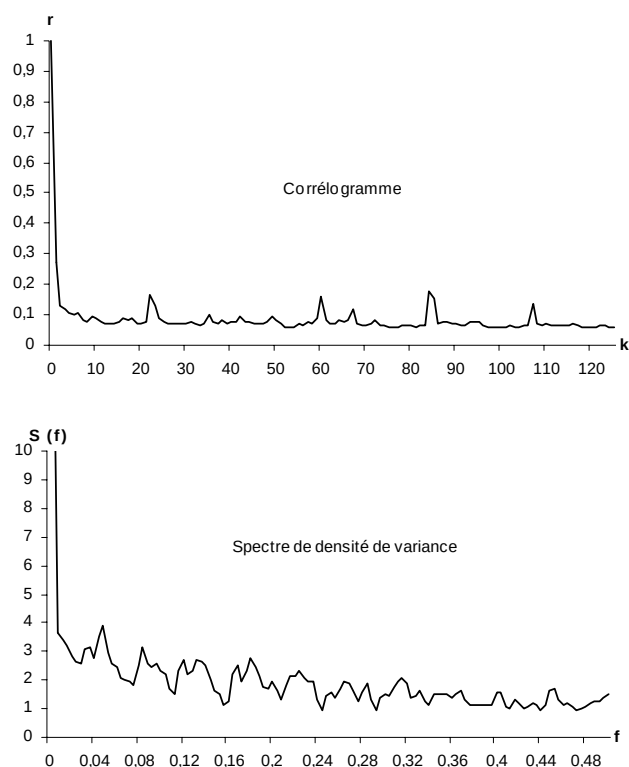


Fig. 54: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ait Bouijane du 01/09/1973 au 31/08/1994 ($m = 125$ jours)

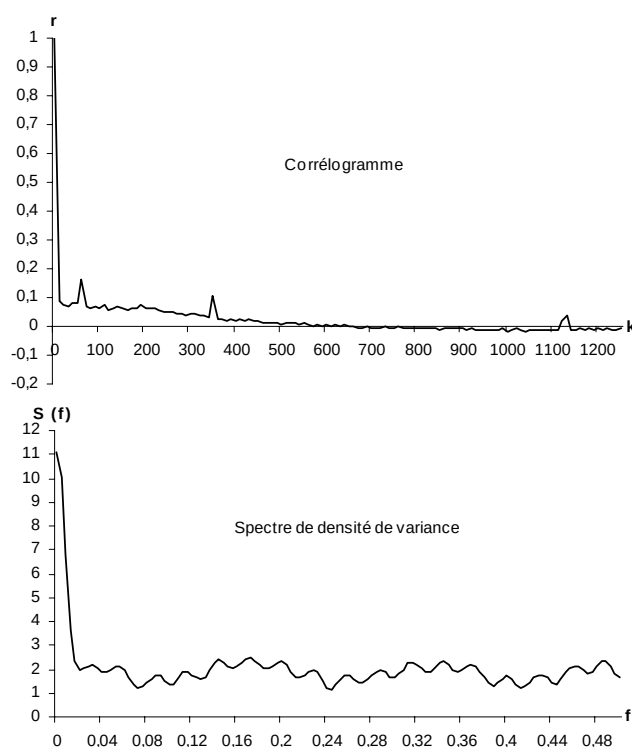


Fig. 55: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ait Bouijane du 01/09/1973 au 31/08/1994 ($m = 1250$ jours)

c) Analyse croisée

Le corrélogramme croisé pluie-débit est assimilable à la réponse impulsionnelle du système. Il montre une montée et une descente rapides et très peu étalées, ce qui indique que la réponse aux impulsions pluie est rapide. Le système n'effectue pas un filtrage de la pluie (Fig. 56).

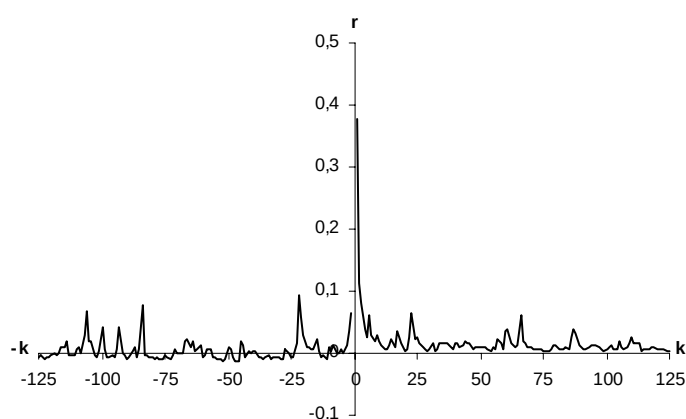


Fig. 56: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station d'Ait Bouijane du 01/09/1973 au 31/08/1994

- Fonctions de cohérence et de gain

La fonction de cohérence traduit la corrélation pluie-débit qui représente un indice de linéarité du système. Pour la station d'Ait Bouijjane, la cohérence est relativement bonne à basses fréquences et devient médiocre pour les hautes fréquences. On note des discontinuités qui correspondent à des changements d'état du système en liaison avec les apports des pluies (Fig. 57).

La fonction de gain apporte la possibilité d'évaluer quantitativement l'importance des amplifications ou des atténuations du signal d'entrée. On note uniquement une atténuation pour les diverses fréquences (Fig. 58). Le pouvoir inertiel du système est assez important, ce qui indique des réserves non négligeables.

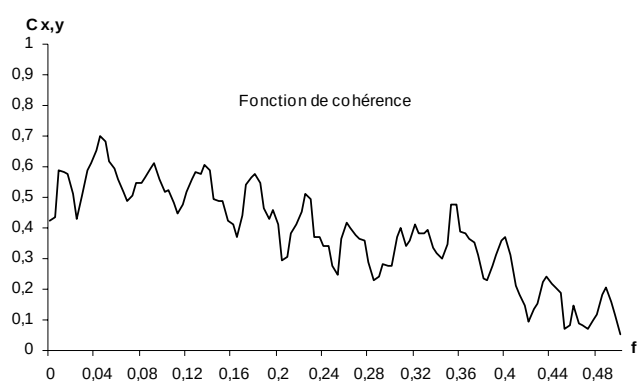


Fig. 57: Fonction de cohérence à la station d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994

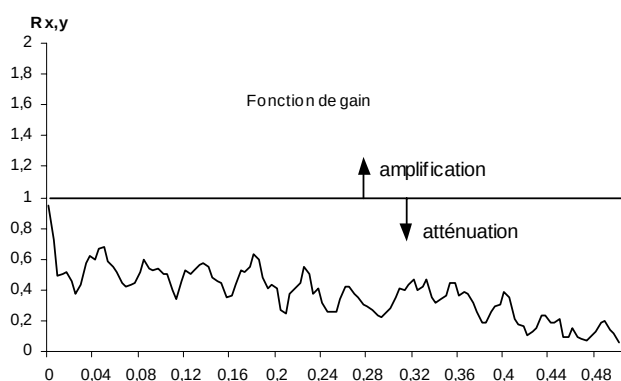


Fig. 58: Fonction de gain à la station de d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994

Tous ces résultats montrent que tous les oueds étudiés ne fonctionnent pas de la même façon, certains possèdent des possibilités de régulation et d'emmagasinement des réserves d'eau souterraine en quantités non négligeables, d'autres non. L'analyse des relations pluie-débit par l'ACS au niveau des différents bassins versants montre aussi une prédominance de l'écoulement superficiel, ceci est en liaison avec la nature des formations argileuses qui affleurent au niveau de ces bassins.

Le tableau 16 récapitule la synthèse des résultats de l'analyse corrélatoire et spectrale (ACS) pour chaque bassin versant étudié.

Bassin versant		Signal Pluie	Signal Débit	Analyse croisée P/ Q	Fonction cohérence	Fonction gain	Conclusion
Moulouya Ansegmir		Aléatoire tr = 0 à 16 j	Effet mémoire fort $F_c = 0.432 \text{ j}^{-1}$ tr = 49.5 j	-Pointue -Drainage fort -Ruissellement rapide	Non linéaire $0.5 > R > 0.1$	Dégradation rapide	Bon stockage en eau
Tensift Aghbalou		Effet saisonnier	Effet mémoire fort $F_c = 0.472 \text{ j}^{-1}$ tr = 46.5 j	-Etalement -Variation lente des réserves	Linéarité médiocre $R = 0.2$	Fort pour les basses fréquences	Bon stockage en eau sur la seule période hivernale
Ziz- Rhéris	Foum Tilicht	-Effet de mémoire faible -Aucune périodicité	-Peu étalé -pouvoir régulateur -périodicité annuelle	-Peu étalée -pouvoir régulateur -périodicité annuelle	Linéarité faible $R = 0.5$	Atténuation pour les moyennes et hautes fréquences	Réserve régulatrice pour les basses eaux
	Ait Bouijjane	-Aléatoire -Aucune périodicité	-Peu étalé -Aucun filtrage de la pluie -Impulsion rapide	-Peu étalée -Aucun filtrage de la pluie -Impulsion rapide	Discontinuités Cohérence bonne pour les basses fréquences	Atténuation pour quelques fréquences	Fort pouvoir inertiel

Tab. 16: Résumé des résultats de l'ACS des bassins versants analysés

III.4.4. Conclusion

L'application de la méthode des analyses corrélatoire et spectrale aux chroniques des débits et des pluies des différents systèmes hydrologiques de surface a permis de dégager les observations suivantes synthétisées dans le tableau 16 précédent :

Le bassin versant de l'oued Ansegmir à la station d'Ansegmir montre une importance des réserves en eau souterraine avec un bon stockage pendant les périodes pluvieuses. On note des retards dans les apports de l'oued.

Le bassin versant de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou présente un bon stockage en eau pendant la seule période hivernale puis un déstockage en période estivale.

Le bassin versant de Ziz à la station de Foum Tilicht dispose d'une certaine réserve qui lui permet de régulariser son régime en périodes de basses eaux.. Les réserves sont situées dans une zone superficielle de l'aquifère multicouche du Jurassique moyen (Dogger : calcaires marneux). Ceci permet aux années excédentaires de compenser les années déficitaires. Le régime de ce système est régularisé et pérenne. Le système de Sidi Hamza est le siège de deux types d'écoulements : un écoulement de surface rapide (hydrogramme pointue) possédant un pouvoir régulateur faible, et un écoulement souterrain (hydrogramme étalé) avec un pouvoir régulateur important.

Le bassin versant de l'oued Rhéris à la station d'Ait Bouijjane ne contrôle qu'une composante de l'écoulement à savoir l'écoulement de surface et il possède en profondeur un système de drainage très développé. Malgré la végétation intense qui pourrait favoriser l'évapotranspiration le long de l'oued Todrha, il reste toujours une quantité d'eau pour l'infiltration qui contribue à l'alimentation des réserves

souterraines. Le système ne possède pas de réserves pouvant régulariser son régime en période déficitaire. Le système est très bien drainé en profondeur, avec un réseau de drainage bien développé.

La forme de l'hydrogramme unitaire pointue et très peu étalée montre que le système présente en majorité des écoulements superficiels rapides (ruissellement) dû à la structure géologique hétérogène. En effet, il est constitué essentiellement dans sa partie Nord par des calcaires marneux du Dogger formant l'aquifère principal et dans sa partie Sud par le Lias inférieur calcaire massif (Domérien, Sinumérien) constituant le principal réservoir.

Les analyses corrélatoire et spectrale nous ont permis d'étudier le comportement de chacun des systèmes hydrologiques de surface étudiés d'un cycle à l'autre, d'estimer l'importance des réserves et d'examiner la relation pluie-débit. D'où l'intérêt de l'utilisation de la méthode (ACS) comme étape préliminaire à la modélisation des fonctions pluie-débit de tout système hydrologique de surface.

IV. CONCLUSION

L'analyse statistique des données physiographiques a permis de comparer et d'identifier les groupes d'affinités entre les différents bassins versants et d'appréhender les liens qui peuvent exister entre les différents paramètres à l'aide des analyses multidimensionnelles (ACP et AFD) ainsi que par le modèle de la régression linéaire pour déterminer la relation des écoulements superficiels avec les paramètres physiques de chaque bassin hydrologique.

L'analyse statistique des pluies et des débits a mis en évidence une variabilité notable dans l'espace et dans le temps des écoulements superficiels et des précipitations au sein de chaque bassin versant, situé dans des contextes géologiques et climatiques différents.

Les ajustements statistiques nous a permis de déterminer les meilleurs lois des séries de débit de crue pour chaque bassin versant analysé ainsi que les périodes de retour.

Les analyses corrélatoire et spectrale (ACS) ont permis la caractérisation de chaque système hydrologique par étude de la relation entre les entrées (pluies) et les sorties (débits) en assimilant le système à une "boîte noire". L'ACS reste un outil descriptif, et non une simulation exacte de la réalité, par conséquent, on utilisera d'autres méthodes, telle que la modélisation des écoulements qui peut prendre en compte plusieurs paramètres physiques du bassin.

La démarche méthodologique proposée a permis de faire une synthèse sur le mode de fonctionnement hydrologique des bassins versants analysés sur la base d'outils statistiques très différents, dont chacun apporte des éléments d'informations plus spécifiques.

Les résultats issus de ces méthodes peuvent être utilisés, afin d'aborder la modélisation des fonctions pluie-débit par application des modèles linéaire et non linéaire (MERO et RNA ou ANN) pour la simulation et la prévision hydrologique.

3^{ème} PARTIE :
MODELISATION DES FONCTIONS
PLUIE-DEBIT

Nous présentons dans cette partie la modélisation des fonctions pluie-débit à l'aide de l'utilisation du modèle de simulation numérique à réservoirs (MMO8) et le modèle non linéaire de réseaux de neurones artificiels (RNA). Le premier modèle a été appliqué pour la simulation des débits à l'exutoire et le deuxième modèle est utilisé pour la prévision hydrologique.

Avant d'entamer cette modélisation, on va tout d'abord donner un bref aperçu sur les différents modèles hydrologiques fréquemment utilisés pour la simulation et la prévision des débits au niveau des exutoires des bassins versants ainsi décrire le mode de fonctionnement des deux modèles appliqués.

I. RAPPELS DES MODELES HYDROLOGIQUES

I.1. Introduction

Un modèle hydrologique est un moyen de représentation sous une forme compréhensible d'un système complexe du cycle de l'eau en phase terrestre.

Les modèles hydrologiques sont des outils très fréquemment utilisés dans le domaine de l'évaluation, de la valorisation et de la gestion des ressources en eau. Les modèles mis au point par les hydrologues permettent de mieux comprendre et prévoir les variations de débit à l'exutoire d'un bassin versant. Les approches globales se sont d'abord imposées, elles sont dites conceptuelles (ou déterministes) ou empiriques (ou stochastiques).

I.2. Modèles conceptuels (ou déterministes)

L'approche déterministe est basée sur la simulation physique du système hydrologique. Le modèle déterministe suppose qu'un calcul exact des paramètres est possible. Dans de nombreux cas, cette hypothèse s'avère peu réaliste, car les phénomènes naturels sont très aléatoires. Les modèles déterministes (ou modèles physiques distribués) sont finalement tous limités par le grand nombre de paramètres à mesurer et par les limites des connaissances actuelles des systèmes naturels complexes.

Cette approche fait appel aux lois de continuité, de l'énergie et des forces d'impulsion ainsi que des autres relations physiques pour traduire les entrées (pluies) et les sorties (débits) et pour représenter le déplacement de l'eau dans un bassin versant.. Cette représentation conduit à un système d'équations différentielles partielles qui doit être résolu de façon numérique. Le modèle SHE (Système Hydrologique Européen) est un bon exemple de modèle appartenant à cette catégorie (Abbott et *al.*, 1986).

Par opposition aux modèles empiriques, les modèles conceptuels reflètent, de par leur structure interne, une conception du système modélisé. Ainsi, moins de données sont nécessaires pour obtenir des prévisions précises. Cependant, la spécification incorrecte du modèle peut causer un biais qui ne pourra être corrigé par l'acquisition de données supplémentaires.

Ils représentent des modèles basés sur la connaissance et la modélisation des phénomènes physiques du bassin versant. En hydrologie, les modèles conceptuels sont souvent utilisés, par exemple pour étendre des séries courtes de débits et pour déterminer des caractéristiques statistiques de l'écoulement.

I.3. Modèles globaux (ou stochastiques)

L'approche stochastique permet de passer outre les limites des connaissances physiques du système. Elle prend seulement en compte l'aspect aléatoire des phénomènes. Contrairement aux modèles déterministes, les modèles globaux fonctionnent comme des "boîtes noires", c.-à-d. sans aucune considération de la structure interne du système. Elle simule les variations observées des sorties sans essayer de décrire le processus physique qui existe derrière ces observations.

Les modèles globaux mettent l'accent sur la compréhension de la relation structurelle régissant les variables de sortie du bassin (débits) et les observations des variables d'entrée. Ils caractérisent globalement les relations pluie-débit par des traitements de séries chronologiques où n'intervient en général aucune donnée sur la nature physique du bassin (Ambroise, 1991) : C'est typiquement le cas des modèles régressifs pluie-débit, des méthodes basées sur les fonctions de transfert, comme celle de l'hydrogramme unitaire (Sherman, 1932) et les modèles stochastiques. Un modèle global peut être une boîte noire : dans la mesure où il produit des prévisions précises, il importe peu de comprendre sa structure interne. L'utilisation récente des réseaux de neurones artificiels (Hsu et *al.*, 1995) relève également de cette catégorie.

II. MODELE MERO (MMO8)

II.1. Introduction

La réponse aux précipitations enregistrées aux stations pluviométriques d'un système hydrologique de surface ou souterrain est conditionnée par des paramètres liés à la surface du bassin versant, la nature des terrains, leur état de saturation, l'évaporation, l'infiltration, les transits et la rétention de l'eau par les terrains. Cette réponse est donnée sous forme d'un débit à l'exutoire. La simulation des écoulements permet de reconstituer l'hydrogramme et d'analyser les mécanismes de fonctionnement et d'alimentation d'un tel système hydrologique. C'est dans cette optique que nous avons utilisé le modèle de simulation qui est le modèle MMO8 qui est mis au point par MERO (MERO F., 1978).

II.2. Principe du modèle MERO

C'est un modèle hydrométéorologique déterministe à pas de temps journalier, basé sur la vidange de réservoirs successifs correspondant à des unités hydrogéologiques constituant le système aquifère (Mero F. & Gilboa Y., 1974 ; Birtles A.B., 1978). Le volume total de l'eau écouable stockée dans un système aquifère peut s'écrire (in Mania, 1982) :

$$V_j = \sum_{j=1}^n \int_0^{\infty} Q_{0,j}(t) \cdot dt = \sum_{j=1}^n \int_0^{\infty} Q_{0,j} e^{\left(-t/t_{0,j}\right)} dt \quad (26)$$

Avec :

j = le numéro d'ordre de l'unité de stockage (aquifères superficiels ou profonds, surfaces de ruissellement),

$Q_{0,j}$ = le débit initial au début du cycle hydrologique de la $j^{\text{ème}}$ unité,

$t_{0,j}$ = le coefficient du temps de tarissement de la $j^{\text{ème}}$ unité ($t_{0,j} = \frac{1}{\alpha_j}$)

La décharge Q d'une unité de stockage est proportionnelle au changement de volume (V) et à la variation de la surface piézométrique (h) des nappes, d'où :

Le débit restitué par un système aquifère peut s'écrire de la forme suivante :

$$\sum_{j=1}^n \frac{dV}{dt} = \sum_{j=1}^n S_j \cdot A_j \cdot \frac{dh_j}{dt} = \sum_{j=1}^n Q_j(t) \quad (27)$$

Avec :

$\overline{h_j}$ = la profondeur moyenne de la nappe pour la $j^{\text{ème}}$ unité,

t = le temps,

S_j = le coefficient d'emménagement de la $j^{\text{ème}}$ unité,

A_j = la superficie de l'affleurement des unités de recharge quand le mouvement libre de l'eau peut prendre place estimé à partir des cartes géologiques puis réajustée au cours du calage du modèle.

Des équations (26) et (27), on tire :

$$Q_j(t) = Q_{0,j} \cdot e^{\alpha_j t} \quad (28)$$

D'où :

$$\frac{Q_j(t)}{Q_{0,j}} = e^{-t/t_0} = e^{-1} = 0,3678 \text{ pour } t = t_0 = \frac{1}{\alpha_j} \quad (29)$$

La séparation des caractéristiques de variation des débits se fait par analyse des hydrogrammes. Cette méthodologie a été appliquée au bassin versant de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou afin de simuler le débit à l'exutoire.

II.3. Fonctionnement du modèle

Les données de base utilisées pour la simulation sont les pluies, les débits et les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) par décade (calculée par la méthode de Thornthwaite). D'autres paramètres sont liés à la morphologie (paramètres de forme) et aux écoulements (paramètres hydrodynamiques et d'infiltration) qui sont modifiables par ajustements successifs au cours des essais de calage du modèle. Celui-ci a nécessité de nombreuses simulations au cours desquelles ont été testées plusieurs hypothèses hydrologiques relatives à la variation de chaque paramètre considéré dans le modèle.

Les paramètres du modèle utilisés dans la simulation des écoulements comportent :

- Paramètres de forme :

Les surfaces topographiques et de recharge sont :

- La surface totale du bassin en km² (A4)
- Les superficies des terrains perméables en km² : aquifère principal (A1) et aquifère secondaire (A2)
- Les formations semi-perméables (A3)

- Paramètres hydrodynamiques et d'infiltration :

↳ Paramètres hydrodynamiques :

Valeurs du temps de tarissement des différentes unités : obtenues par analyse des hydrogrammes (décrue et tarissement)

Pendant la durée de ce coefficient de temps, le débit du réservoir est réduit des 2/3. On note les coefficients de temps de tarissement suivants (en jours) : de l'aquifère principal (t_{01}), de l'aquifère secondaire (t_{02}), de l'unité à écoulement retardé hypodermique (t_{03}) et de l'unité de ruissellement dont l'écoulement est dû à une concentration rapide (t_{04}),

↳ Paramètres d'infiltration

L'interception des eaux de surface (UST en mm)

Les paramètres régulateurs de l'infiltration portent sur la capacité de rétention des sols :

* équivalent maximal de la capacité au champ ou de la limite de rétention capillaire (LCF en mm)

= 1^{er} réservoir de l'hypothèse de MERO

* équivalent de l'humidité maximale de la totalité du sol et de l'eau de rétention capillaire (LST en mm)

* valeur initiale de l'humidité du sol dans le 1^{er} réservoir (L1 en mm)

- * valeur limite de l'infiltration de surface sur les zones perméables (P_0 en mm)
- * valeur limite de l'infiltration de surface sur les zones imperméables et semi-perméables (Q_0 en mm)
- * facteur de proportionnalité agissant sur la fonction de régulation du ruissellement CT entre 0.5 et 1
- * valeur limite de la hauteur de pluie journalière quand la réduction de l'ETP est réalisée (RPE en mm)
- * temps de concentration des écoulements hypodermiques et de surface en demi-journées (SND en jours)
- * paramètre de variation saisonnière de la valeur (UST)
- * paramètre de variation saisonnière de la valeur (LFC en mm)
- * paramètre de régulation de la vidange des eaux souterraines (DM en jours)
- * exposant de la fonction régulant l'évaporation EX entre 1.5 et 2
- * valeur initiale du débit du réservoir principal S1IN (m^3/s)
- * valeur initiale du débit du réservoir secondaire S2IN (m^3/s).

Le programme de calcul restitue respectivement :

➔ au pas journalier :

- les valeurs de débit calculé des quatre unités de stockage ainsi que le débit total à l'exutoire,
- les précipitations
- la lame d'infiltration,
- l'humidité des horizons L1 et L2 du milieu,
- le débit total mesuré à la station hydrométrique.

➔ au pas mensuel :

- les différents débits signalés ci-dessus (exprimés en volume),
- la pluie totale,
- la lame d'infiltration cumulée,
- le coefficient de corrélation entre les débits mesurés et simulés.

➔ au pas annuel :

- les différents types de débits cités précédemment,
- la pluie totale,
- la lame d'infiltration totale,
- la lame ruisselée totale,
- l'ETP et l'ETR annuelle.

Le débit simulé par le modèle MMO8 est essentiellement lié à l'état des réserves dans chacune des unités en fonction de leur temps de tarissement. Le mode de fonctionnement du modèle MERO est illustrée dans le schéma simplifiée de la figure 59 (Lallahem., 2002).

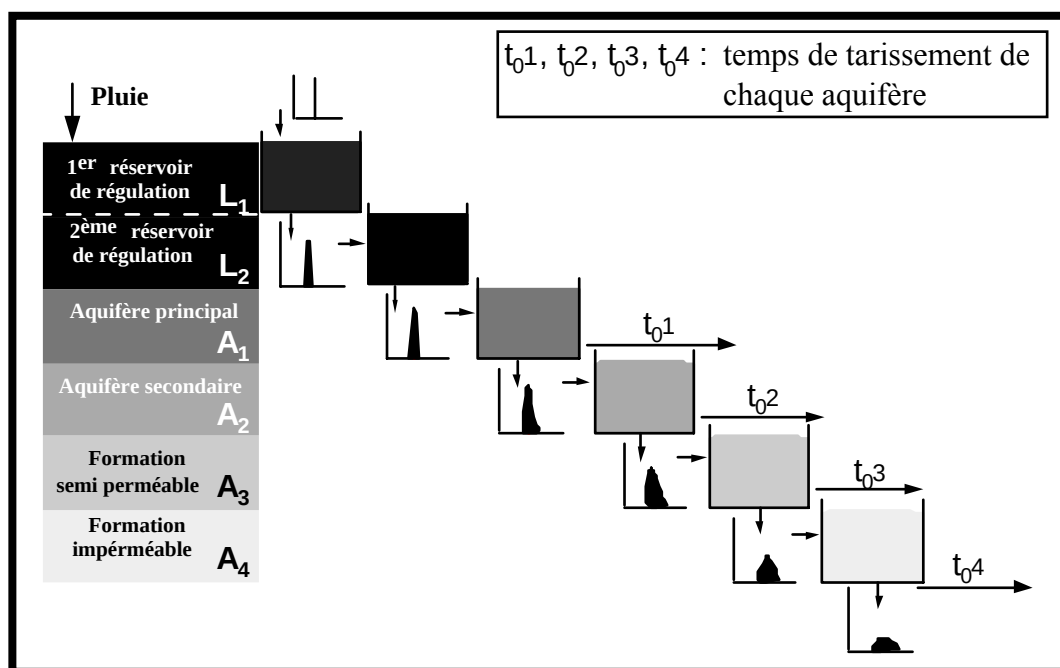


Fig. 59: Schéma simplifié du mode de fonctionnement du modèle MERO

II.4. Résultats de la simulation

Le modèle **MERO** a été appliqué à quelques bassins marocains et ne sera présenté que pour le bassin versant d'Ourika sur une année hydrologique moyenne (1972-1973) à titre d'exemple.

Le bassin de l'Ourika appartient au domaine du Haut Atlas occidental. Il comprend une grande partie des hautes montagnes de l'Afrique du Nord et en particulier la plus élevée d'entre elles (Jbel Toubkal, 4165 m d'altitude).

Les formations lithologiques sont en grande partie imperméables et compactes occupant plus de 55% de la superficie totale du bassin. Elles sont constituées essentiellement de terrains cristallins et fissurés du socle localisés dans la zone axiale et des grès dans la zone des Hauts Plateaux.

Les terrains semi-perméables (argiles rouges du Trias, schiste, flysch, granite, basalte,...) sont localisés dans la zone subatlastique, avec une portion de 39% de la surface totale du bassin. Quant aux terrains perméables (calcaire, basalte, alluvions,...), ils représentent moins de 6%, localisés sur la bordure Nord de la zone subatlastique et dans les fonds des vallées et sur les versants. Bien alimentés en hiver et printemps, les grès se tarissent très rapidement d'où l'explication du stockage saisonnier.

Les différents paramètres hydrodynamiques introduits dans le modèle sont modifiés successivement jusqu'au calage du modèle (= écarts minimums entre débits calculés et débits mesurés).

Les paramètres retenus sont donnés dans le tableau suivant et ce sont ceux qui donnent le meilleur ajustement graphique des débits calculés sur les débits observés, après plusieurs essais de simulation (Tab. 17).

Paramètres de surface + paramètres d'infiltration et hydrodynamiques			
A1	400	P ₀	30
A2	50	Q ₀	1
A3	80	CT	0.4
A4	530	RPE	15
t ₀₁	70	SND	6
t ₀₂	40	UST	2
t ₀₃	15	LFC	10
t ₀₄	2	DM	10
UST	2	EX	1.9
LST	20	S1IN	1.5
L1	10	S2IN	

Tab. 17: Paramètres retenus de la simulation du modèle MERO pour le bassin étudié

Les résultats obtenus de la comparaison entre les hydrogrammes observés et calculés et de l'influence des pluies sont illustrés dans la figure 60.

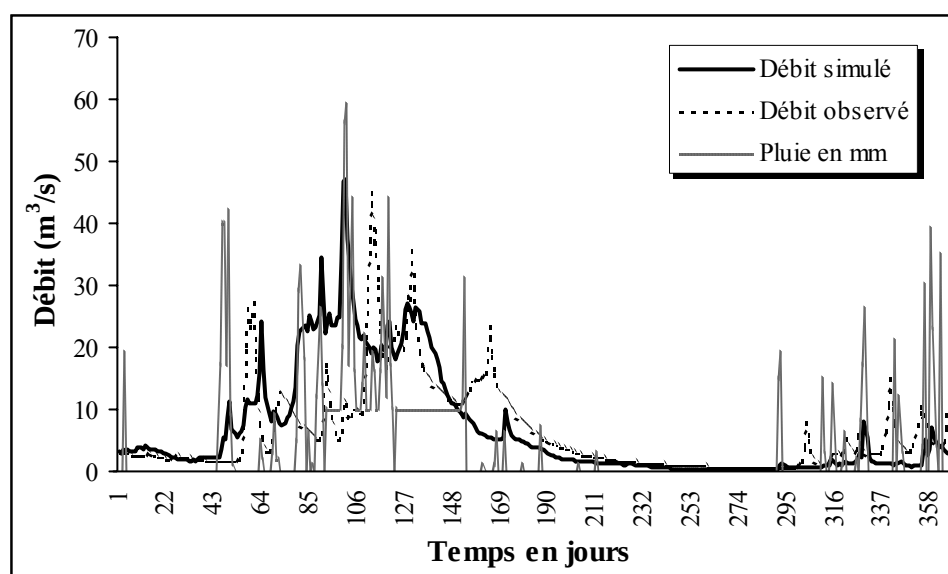


Fig. 60: Comparaison des hydrogrammes des débits simulés et observés (1972-1973)

L'effet limitant de cette simulation est lié à l'existence d'une seule station de mesure qui est la plus équipée, situé en montagne et à l'aval du bassin versant de l'oued Ourika, à une altitude de 1000m (station d'Aghbalou). Aussi les résultats auraient pu être meilleurs avec un réseau de stations climatiques réparties sur tout le massif montagneux. Il faut noter également l'existence d'un manteau neigeux en montagne dont la fusion intervient entre mars et mai.

III. RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

III.1. Présentation de la méthode neuronale

Les réseaux de neurones artificiels (**RNA** ou **ANN**) constituent une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes, particulièrement utile lorsque ces systèmes sont difficiles à modéliser à l'aide des méthodes statistiques classiques. Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain (McCulloch et Pitts, 1943) en se basant principalement sur le concept des neurones. Il s'agit d'un modèle empirique non linéaire (Fortin et *al.*, 1997). Il se compose d'éléments de traitement interconnectés (neurones) travaillant conjointement pour résoudre un problème spécifique. R. Hecht Nielsen 1990 donne la définition suivante : un réseau de neurones est un système de calcul composé d'éléments de traitement simples fortement interconnectés, qui traitent l'information par leur changement d'état dynamique en réponse à une entrée externe.

III.2. Connections entre les neurones

Les réseaux de neurones sont organisés en couches ; ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation. Des entrées ($X_1, X_i, \dots, X_n$) sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connections entre les neurones se font par des poids ($W_1, W_i, \dots, W_n$) (Fig. 61).

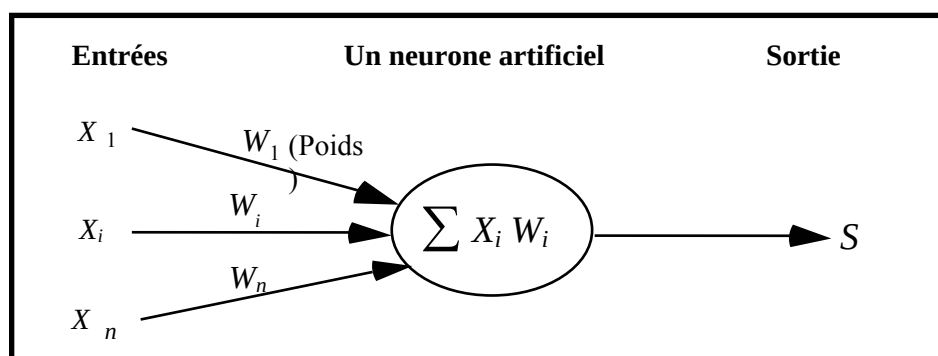


Fig. 61: Schéma d'un neurone artificiel

Le fonctionnement d'un neurone artificiel s'inspire du fonctionnement schématisé du neurone humain (Fig. 62).

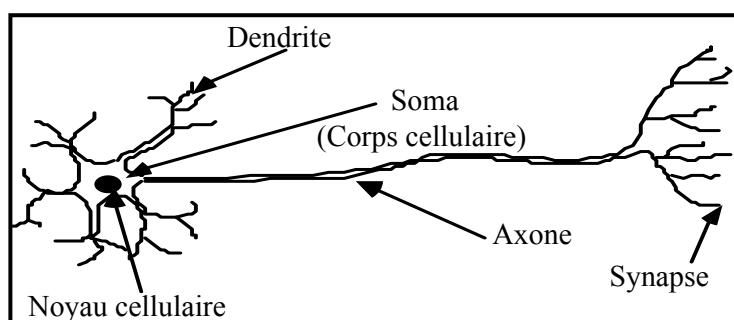


Fig. 62: Schéma d'un neurone biologique

Le tableau suivant résume l'analogie entre les neurones biologiques et artificiels (Tab. 18).

Neurone biologique	Neurone artificiel
Soma	Neurone
Dendrite	Entrée (Input)
Axone	Sortie (Output)
Synapse	Poids

Tab. 18: Analogie entre les neurones biologiques et artificiels

III.3. Perceptron Multicouche (PMC)

Il existe une grande variété d'agencements possibles de neurones artificiels (Lippmann, 1987), mais le type de réseau le plus utilisé pour la prévision de phénomènes hydrologiques est le Perceptron Multicouche (PMC). Ce réseau comporte une couche de neurones artificiels pour capter les entrées, une ou plusieurs couches cachées (MLP ou MultiLayers Perceptron) et une couche de neurones artificiels pour émettre les sorties du modèle. Chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à d'autres neurones par la voie des poids (W_{ij} et W_{jk}) [Najjar and Zhang (2000), Najjar and Ali (1998a) & (1998b)].

La fonction de transfert ou d'activation de non-linéarité peut avoir plusieurs formes différentes. La fonction la plus utilisée est en général une somme pondérée de type sigmoïde car il s'agit d'une fonction continue, non décroissante, différentiable et bornée, mais aussi elle introduit de la non-linéarité et dérivée d'elle-même.

A chaque connexion entre les neurones de deux couches successives est associé un poids modifiable au cours de l'apprentissage en fonction des jeux de données en entrée et en sortie. Un PMC peut contenir autant de couches cachées que l'on désire mais il a été montré que quel qu'en soit le nombre, il existe un MLP équivalent avec une seule couche cachée. Ainsi, on se limitera dans cette étude à l'utilisation de MLP comportant une seule couche cachée.

Si les états des neurones de la couche d'entrée sont déterminés par les variables à l'entrée du réseau, les autres neurones (de la couche cachée et de sortie) doivent évaluer l'intensité de la simulation en provenance des neurones de la couche précédente par la relation suivante :

$$S_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} + b_j \quad (30)$$

Avec S_j : somme des poids entre les entrées du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée ; X_i : valeur de sortie du $i^{\text{ème}}$ neurone de couche précédente ; W_{ij} : poids synaptique du neurone i de la couche d'entrée au neurone j de la couche cachée, b_j est le biais ou le seuil d'activation du neurone j .

La réponse des neurones est une fonction d'activation non linéaire de type sigmoïde qui est défini par la formule suivante :

$$f(S_j) = \frac{1}{1 + e^{-S_j}} \quad (31)$$

$f(S_j)$ est pratiquement linéaire entre 0 et 1.

Les valeurs des variables d'entrée ont été normalisées entre [0, 1] par le modèle selon l'équation suivante :

$$\overline{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (32)$$

Avec : X est la valeur de la variable d'entrée, $X_{\min}$ est sa valeur minimale, $X_{\max}$ est sa valeur maximale et $\overline{X}$ est la valeur de la variable normalisée.

IV. APPLICATION DU MODELE DE RNA (ou ANN)

Les réseaux de neurones artificiels, connus généralement sous l'acronyme **ANN** (Artificial Neural Network), sont des modèles mathématiques non linéaires de type "boîte noire" capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système.

Les performances de ces derniers dans la modélisation non linéaire ont été prouvées dans plusieurs domaines de l'ingénierie et de la science. Dans le domaine de l'ingénierie essentiellement en géotechnique on peut citer Najjar et al (1996), Najjar and Ali (1998a) & (1998b) et Najjar and Zhang (2000) qui ont appliqué les RNA pour l'évaluation de la perméabilité des argiles et la liquéfaction des sols.

En hydrologie de surface, les réseaux de neurones sont utilisés pour la prévision de la qualité de l'eau (Maier et Dandy, 1996), pour la prévision de la demande en eau (Cubero., 1991), pour la prévision du débit (Karunanithi et al., 1994, Dimopoulos et al., 1996, Lek et al., 1996, Coulibaly et al., 2000, Imrie et al., 2000, Sivakumar et al., 2002) et pour la prévision des précipitations (French et al., 1992, Luk. Kin et al., 2001). En outre, les réseaux de neurones sont utilisés pour modéliser la relation pluie-débit (Hsu et al., 1995, Smith et Eli., 1995, Minns., 1996, Shamseldin., 1997, Dawson et Wilby., 1998 et 2000, Sajikumar et Thandaveswara., 1999, Tokar et Johson., 1999) et pour la prédiction de l'évaporation (Sudheer et al., 2002).

D'autres auteurs ont appliqué avec succès les méthodes neuronales pour la prévision des séries chronologiques dans différents domaines (Chen *et al.*, 1990, Chakraborty *et al.*, 1992, Hoptroff., 1993, Zhang., 1994, Hu *et al.*, 2001) et dans la caractérisation des pollutions de sol (Dan *et al.*, 2002). Dans le domaine de l'hydrogéologie, les réseaux de neurones sont utilisés pour la prévision de la turbidité de l'eau dans un milieu karstique (Beaudeau *et al.*, 2000), et pour déterminer les paramètres qui influencent les débits des sources, pour la simulation et la prévision des débits dans un milieu crayeux fissuré (Lallahem et Mania., 2002a & 2002g).

IV.1. Architecture du réseau

L'architecture du réseau précise le nombre de couches qui le composent et le nombre de neurones dans chaque couche, ainsi que le poids des connexions. Un réseau de neurones artificiels est organisé en couches, chacune de ces couches comportant plusieurs neurones. Chacun de ces neurones qui se présente comme unité de calcul autonome, est relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes par l'imposition de poids.

Le réseau de neurones utilisé dans notre étude est un réseau à trois couches : une couche d'entrée qui recevra les données source que l'on veut utiliser pour l'analyse, une seule couche cachée constituée par l'ensemble de neurones des sorties de la couche d'entrée et une couche de sortie qui donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données entrant dans la première couche (Fig. 63). La fonction de transfert appliquée est de type sigmoïde. Le réseau de neurones utilisé est l'algorithme de rétropropagation de l'erreur qui correspond au Perceptron multicouche (Rumelhart *et al.*, 1986).

Dans ce travail, l'utilisation d'une seule couche cachée est suffisante pour le modèle de RNA (Cybenko., 1989, Hornik *et al.*, 1989). Dans la majorité des cas, pour limiter le temps de calcul et surtout lorsque les résultats sont en général satisfaisants, c'est un réseau à une seule couche cachée qui est utilisé. Ce type de réseau de neurones est appelé un réseau multicouche ou feedforward (FNN).

Parfois l'addition d'une couche cachée n'a pas diminué l'erreur et elle fait décliner la performance et la convergence du modèle. Les meilleurs résultats de la simulation avec bonne convergence et performance du modèle sont obtenus dans le cas d'utilisation d'une seule couche cachée (Lallahem., 2002).

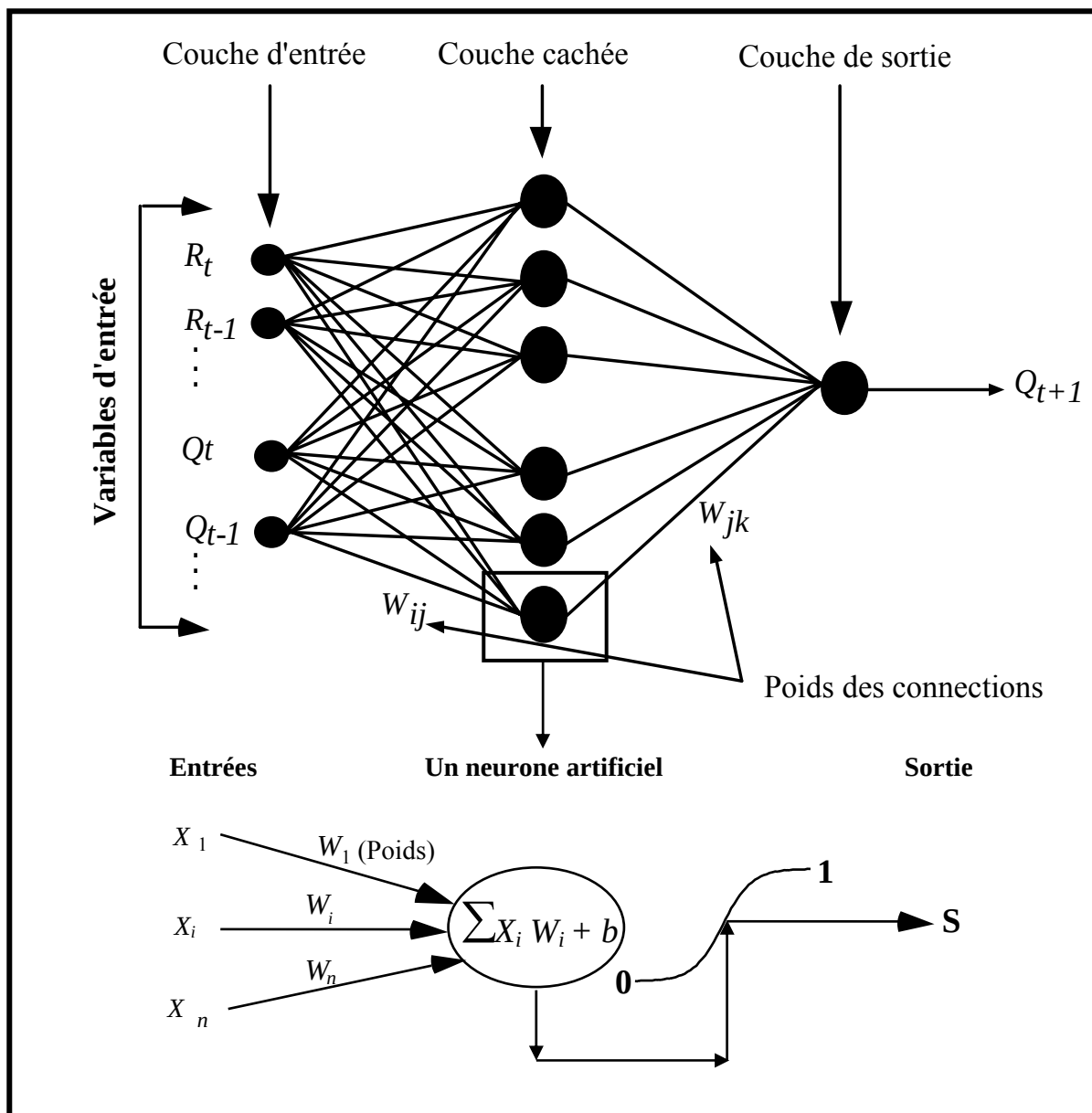


Fig. 63: Architecture du modèle RNA à trois couches utilisée dans cette étude

IV.2. Collecte des données

L'application de ce modèle a été effectuée sur les données journalières de pluie (R) et de débit (Q) des bassins versants de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou et de l'oued Ansegmir à la station d'Ansegmir. Le bassin versant de l'oued Ourika est un sous bassin versant parmi les plus importants du bassin versant de l'oued Tensift. Il draine une superficie de 530 km² avec des précipitations moyennes de 586 mm par an (1969-1996). Il présente un grand intérêt socio-économique dans la région du Haut Atlas de Marrakech.

Pour notre étude, pour prédire le débit nous avons utilisé à l'entrée du réseau des valeurs des débits et de pluies observées à des instants précédents ($t-1$, $t-2$, $t-3$,...). En conséquence, la sortie du réseau représente la valeur prévue de débit pour le jour suivant $t+1$ (Q_{t+1}).

La structure du modèle RNA peut être représentée par la forme suivante :

$$\{Q_{t+1}\} = \text{ANN} [R_t, R_{t-1}, R_{t-2}, R_{t-3}, \dots, R_{t+1}, Q_t, Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}, \dots] \quad (33)$$

La base de données a été divisée en trois phases : La phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation. L'apprentissage est la propriété la plus intéressante du modèle des réseaux de neurones. Pour apprendre, le réseau doit connaître la réponse qu'il aurait dû donner. C'est la phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré. L'intérêt du test est d'arrêter l'apprentissage (la minimisation) au bon moment. Une fois le réseau calculé, il faut procéder à des tests pour vérifier que le réseau réagit bien comme on le souhaite : c'est la validation. La méthode la plus simple pour faire la validation est de garder une partie de l'échantillon réservé à l'apprentissage pour la validation et faire ainsi une validation hors-échantillon.

Entre 60 à 80% de cet ensemble de données est utilisé pour la phase d'apprentissage, 10 à 20% de données constituent la phase de test et les 10 à 20% de données restantes sont réservées pour la phase de validation. La majeure partie des données est utilisée dans la phase d'apprentissage pour fournir des résultats très satisfaisants et adéquats.

IV.3. Critères de performance du modèle

La modélisation par le réseau de neurones artificiels consiste à trouver le nombre optimal de neurones dans la couche cachée ainsi le nombre d'itérations pour aboutir au modèle le plus performant qui est déterminé par le minimum du nombre de nœuds et d'itérations. La performance du modèle de RNA est aussi validée par d'autres paramètres statistiques des phases d'apprentissage et du test et qui correspondent au nombre optimal de neurones de la couche cachée et du nombre d'itérations.

Les paramètres statistiques utilisés dans ce travail sont : L'erreur moyenne des carrés *ASE* (Average Squared Error), le coefficient de détermination R^2 et l'erreur moyenne absolue et relative *MARE* (Mean Absolute Relative Error). Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$ASE = \sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2 / N \quad (34)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qt_i - \bar{Q}t)^2} \quad (35)$$

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{Q}t_i - Qt_i}{Qt_i} \right|}{N} \times 100 \quad (36)$$

Où Qt_i est la valeur mesurée du débit, $\hat{Q}t_i$ est le débit calculé par le modèle, $\bar{Q}t$ est le débit moyen mesuré et N est le nombre de données de l'ensemble de calage.

La valeur de l' *ASE* donne une indication sur l'erreur de prévision obtenue lors de la phase de test de la modélisation et R^2 montre la variation de la valeur du débit calculé ou estimé par le modèle de la régression linéaire. Les valeurs idéales pour *ASE* et *MARE* sont égales à 0 et R peut correspondre à 1.

La performance du modèle est aussi déterminée graphiquement par l'alignement du nuage de points autour de la courbe $y = x$ (droite linéaire à 45°).

IV.4. Résultats et discussions

IV.4.1. Sélection des entrées du réseau

Les variables d'entrée du modèle correspondent aux valeurs moyennes journalières de pluies (R) et de débits (Q) observées à des instants précédents ($t-1, t-2, t-3, \dots$) du bassin versant de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou.

La *première étape de modélisation* consiste à utiliser toutes les données disponibles sur la zone d'étude qui couvre une période d'enregistrement de 28 ans (1969-1996). Ce qui correspond à 10 220 valeurs journalières des pluies et des débits. Le vecteur d'entrée du modèle est représenté par les précipitations (R) et les valeurs des débits (Q) pour les 7 jours précédents (c.à.d : $t, t-1, t-2, t-3, t-4, t-5, t-6$) aussi bien que la valeur de pluie prévue pour le jour $t+1$. Le vecteur de sortie représente la valeur prévue du débit pour le jour $t+1$ (24 heures) (Fig. 64).

Le modèle de RNA est représenté par la forme suivante :

$$\{Q_{t+1}\} = \text{ANN} [R_{t-6}, R_{t-5}, R_{t-4}, R_{t-3}, R_{t-2}, R_{t-1}, R_t, R_{t+1}, Q_{t-6}, Q_{t-5}, Q_{t-4}, Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1}, Q_t] \quad (37)$$

Le choix de la période de décalage a été basé sur la relation pluie-débit, c'est à dire sur le temps de réponse du bassin suite à une telle pluie pour générer un débit enregistré à l'exutoire. Les résultats obtenus montrent une meilleure convergence du modèle et donc des bonnes prévisions.

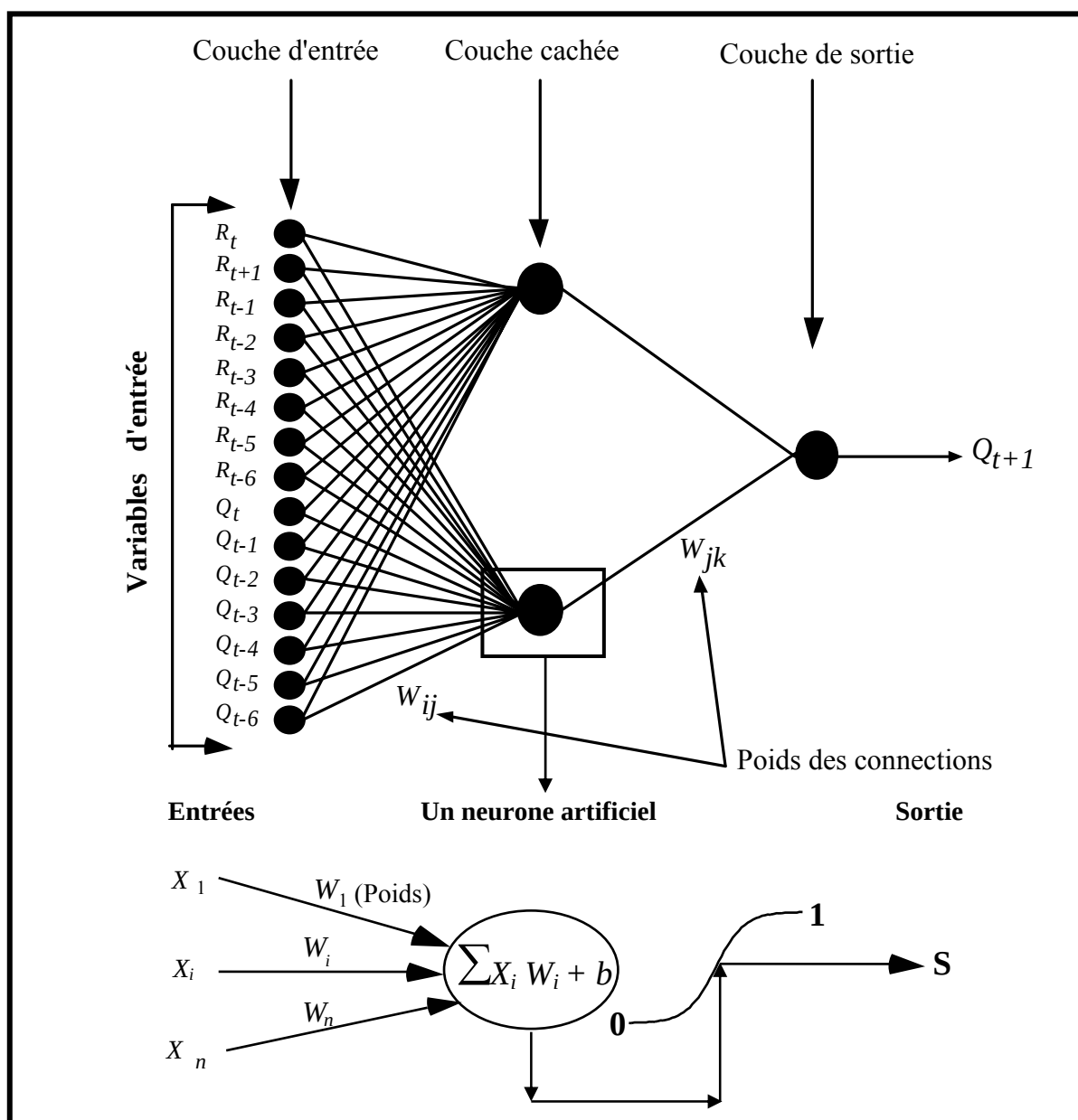


Fig. 64: Architecture du modèle RNA à trois couches

La deuxième étape de modélisation consiste à déterminer le nombre optimal d'années à retenir ainsi que le décalage dans le temps (le passé des variables d'entrée ou pas du temps) des paramètres de la couche d'entrée (nombre de jours) par le modèle RNA. Ce qui permet à l'utilisateur de faire des bonnes prévisions à partir des données de courte période d'enregistrement car l'acquisition et la disponibilité des données pour une longue période réside un grand problème.

Un autre avantage est que le calcul sera allégé avec une base de données moins puissante par comparaison avec celle utilisée dans la première étape de modélisation.

Les variables d'entrée ont été sélectionnées par le modèle de RNA en calculant l'erreur moyenne *ASE* de la phase de test de telle manière qu'elle soit le minimum possible.

Les résultats révèlent que l'erreur minimum *ASE* de la phase de test a été obtenue en utilisant un nombre de deux années (1993 et 1994) pour la phase d'apprentissage et des deux jours précédents (le pas de temps sera de 2 jours) (Fig. 65).

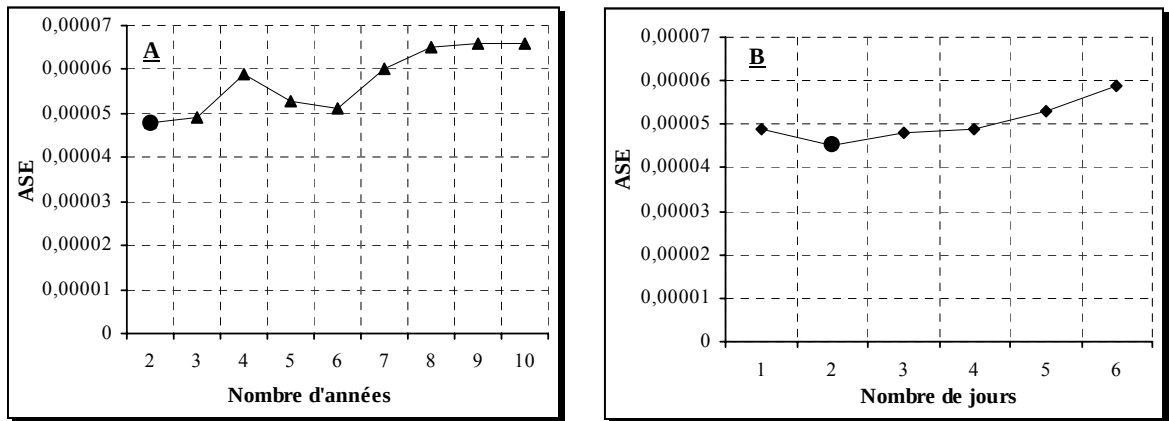


Fig. 65: Sélection des variables d'entrée par ASE (Average Squared Error)

A: Nombre d'années, B: Nombre de jours

Les variables utilisées donc à l'entrée du réseau sont : R_{t-1} , R_t , R_{t+1} , Q_{t-1} , Q_t (Fig. 66). Dans ce cas, la structure du modèle de réseau de neurones peut être exprimée comme suit :

$$\{Q_{t+1}\} = \text{ANN} [R_{t-1}, R_t, R_{t+1}, Q_{t-1}, Q_t] \quad (38)$$

Le choix de ces variables d'entrée aboutit à une meilleure convergence et performance du modèle.

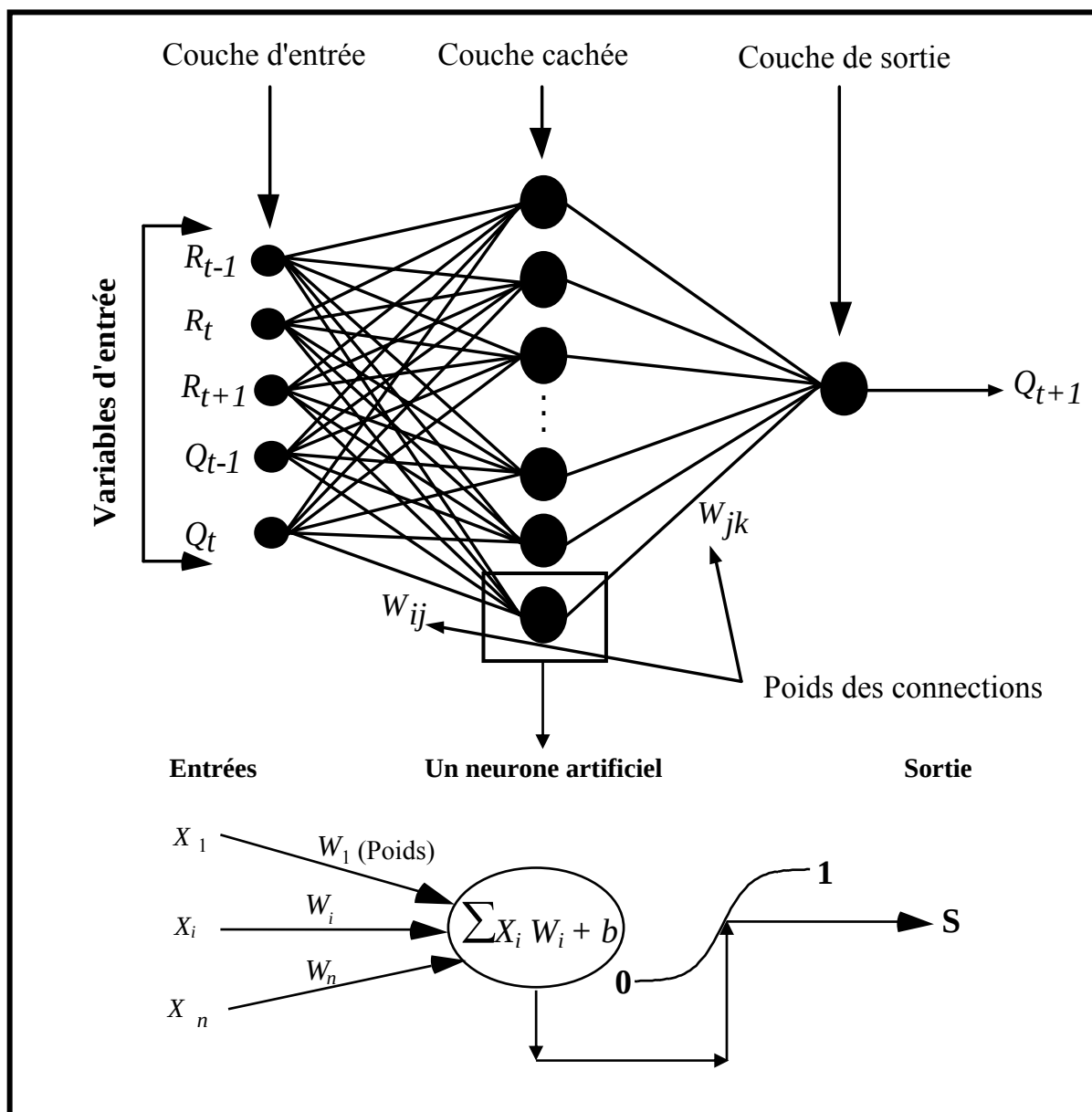


Fig. 66: Architecture du modèle RNA

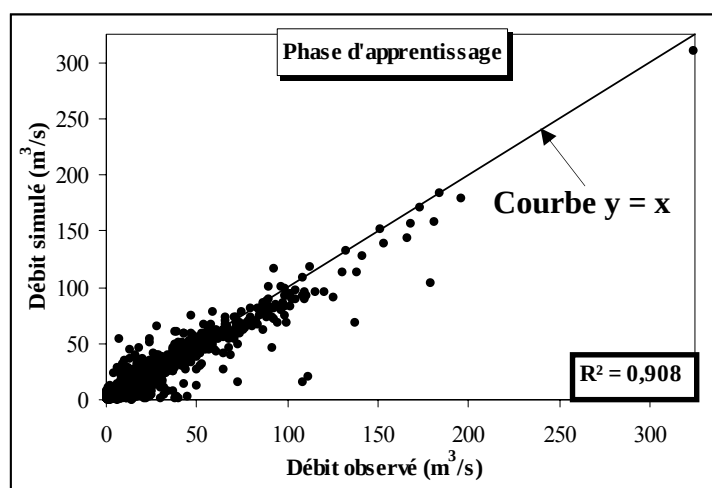
IV.4.2. Prédiction des débits

Pour la première étape de modélisation, les données sont subdivisées en deux parties : 25 ans (1969-1993) sont utilisés pour l'apprentissage et les trois dernières années (1994-1996) pour le test du modèle RNA.

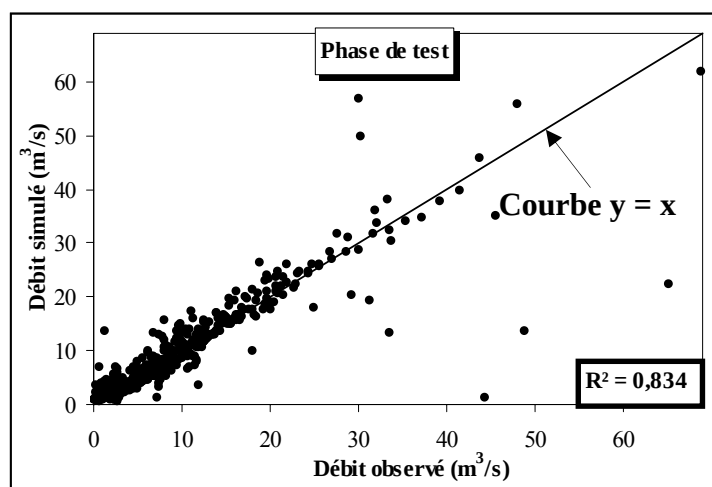
L'apprentissage du réseau a été effectué de façon que la moyenne des carrés des erreurs (ASE) soit minimale essentiellement pour la phase de test. Le calage et la convergence du modèle ont été testé donc par rapport à l'erreur moyenne ASE de la phase de test.

Dans ce cas, le modèle converge pour un nombre de neurones de 13 dans la couche cachée avec 700 itérations et par conséquent on enregistre une valeur minimale d'erreur de l'ASE pendant la phase de test.

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 67 qui illustre une comparaison entre les diagrammes de données de débits observés et simulés à $t+1$ pour les phases de modélisation respectivement l'apprentissage et le test.



Paramètres statistiques	Débit observé (m³/s)	Débit simulé (m³/s)
Moyenne	6.52	6.58
Ecart type	14.59	13.15
Minimum	0	0.1
Maximum	324	311.05
Coefficient de variation	2.24	2.0



Paramètres statistiques	Débit observé (m³/s)	Débit simulé (m³/s)
Moyenne	4.91	5.19
Ecart type	7.45	7.41
Minimum	0.1	0.8
Maximum	68.8	68.18
Coefficient de variation	1.52	1.43

Fig. 67: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle de RNA pour les phases d'apprentissage et de test

Les paramètres statistiques pour la phase d'apprentissage et la phase de test sont donnés dans le tableau (19) suivant :

	<i>ASE</i>	<i>R²</i>	<i>MARE</i>
Phase d'apprentissage	0.000080	0.908	1.282%
Phase de test	0.000038	0.834	0.718%

Tab. 19: Paramètres statistiques du modèle de réseau de neurones du bassin d'Ourika

Dans la deuxième étape de modélisation, la base de données a été subdivisée en trois ensembles : un pour le calage du modèle c'est l'apprentissage, un autre pour le test du modèle et le dernier pour la validation. En effet, le test a été effectué sur un ensemble de 365 valeurs de pluie et débit de l'année 1995, la validation sur un jeu de données n'ayant pas participé au calage du modèle (année 1996) et l'apprentissage étant réalisé sur l'ensemble des données restantes (1993 et 1994).

Le modèle le plus performant est obtenu pour un nombre de neurones de 15 dans la couche cachée et avec 1000 itérations. Le nombre de neurones dans la couche cachée a été fixé à 15, ce qui correspond au minimum d'erreur de ASE (Fig. 68).

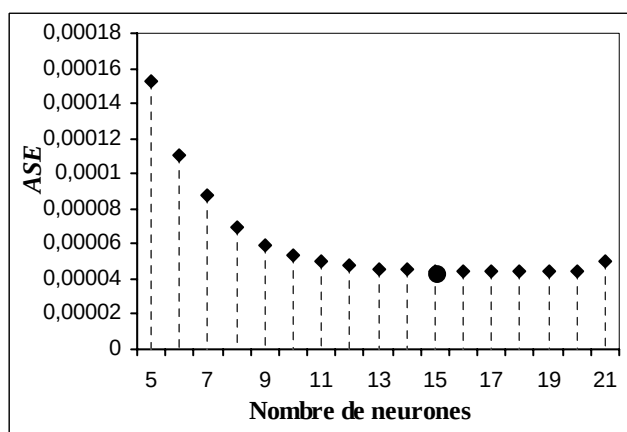


Fig. 68: Evaluation de ASE en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée

En général, le nombre de neurones dans la couche cachée (*NHN* : Number of Hidden Nodes) est donnée par l'équation suivante :

$$NHN = \left(\frac{N_{\text{apprentissage}} - N_{\text{output}}}{N_{\text{input}} + N_{\text{output}} + 1} \right) \times \frac{1}{10}$$

Où :

N apprentissage : Nombre de données dans l'apprentissage

N input : Nombre de données dans la couche d'entrée

N output : Nombre de données dans la couche de sortie

Les paramètres statistiques pour la phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation sont donnés dans le tableau (20) suivant :

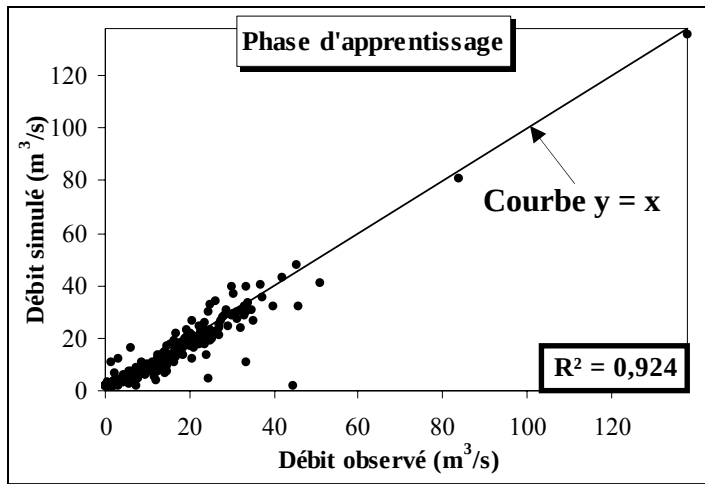
	<i>ASE</i>	<i>R²</i>	<i>MARE</i>
<i>Apprentissage</i>	0.000034	0.9243	1.857%
<i>Test</i>	0.000045	0.8802	0.874%
<i>Validation</i>	0.000013	0.8724	2.148%

Tab. 20: Paramètres statistiques du modèle de réseau de neurones

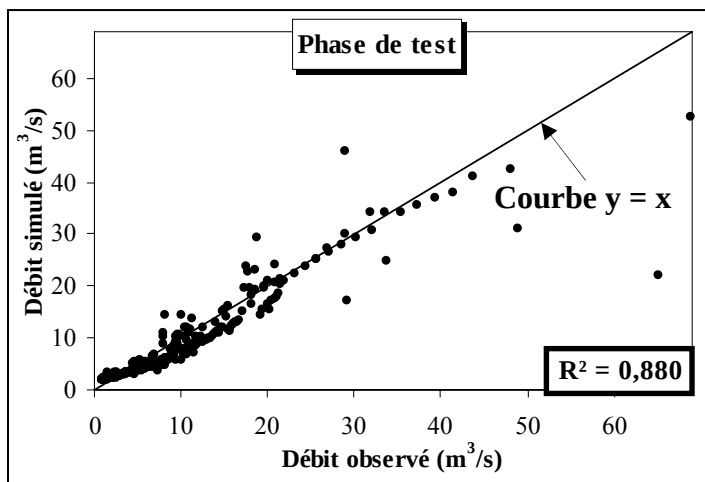
ASE : Average Squared Error, *R²* : coefficient de détermination, *MARE* : Mean Absolute Relative Error

La comparaison des données simulées et observées forment un nuage de points situé autour de la droite linéaire ($y = x$) pour les différentes phases du modèle de RNA. La figure 69 illustre les diagrammes de données de débits simulés à $t+1$ pour les trois phases de modélisation respectivement l'apprentissage, le test et la validation. La droite de nuage de points est répartie statistiquement selon une orientation de 45° (autour de la droite $y = x$). Les résultats obtenus montrent une très bonne concordance expliquée par un coefficient de corrélation élevé pour la phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation. Ce qui indique que ces résultats sont très satisfaisants.

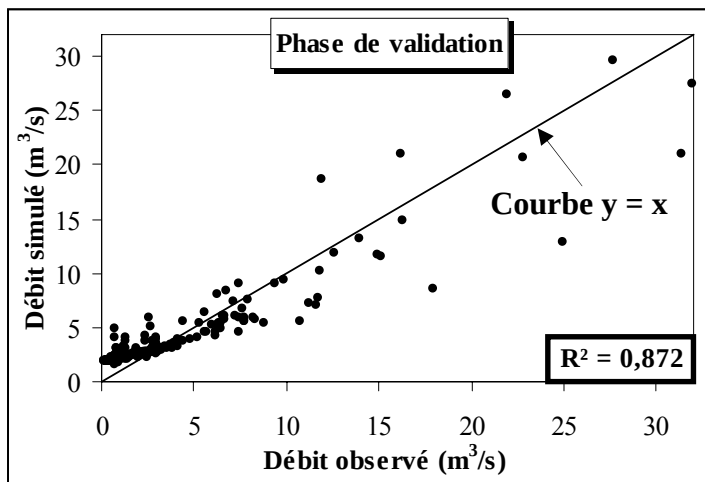
Les paramètres statistiques des valeurs estimées par le modèle du réseau neural et ceux des valeurs observées sont très proches avec une amélioration notable du coefficient de variation pour les débits simulés.



Paramètres statistiques	Débit observé (m^3/s)	Débit simulé (m^3/s)
Moyenne	6.9	6.53
Ecart type	10.4	9,49
Minimum	0.1	1.9
Maximum	138	135.8
Coefficient de variation	1.65	1.45



Paramètres statistiques	Débit observé (m^3/s)	Débit simulé (m^3/s)
Moyenne	8.47	7.86
Ecart type	9.44	8.29
Minimum	0.8	2.2
Maximum	68.8	52.54
Coefficient de variation	1.11	1.05



Paramètres statistiques	Débit observé (m^3/s)	Débit simulé (m^3/s)
Moyenne	2.71	3.46
Ecart type	4.29	3.44
Minimum	0.1	1.7
Maximum	31.9	29.7
Coefficient de variation	1.58	0.99

Fig. 69: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle de RNA pour les phases d'apprentissage, de test et de validation

IV.4.3. Comparaison avec le modèle de régression linéaire multiple

Pour évaluer la performance du modèle de RNA, une comparaison avec d'autres modèles plus classiques essentiellement le modèle de la régression linéaire multiple (RLM) a été utilisé. L'application de ce modèle a été faite sur les mêmes jeux de données utilisés dans la méthode neuronale pour les deux phases de modélisation.

Pour la première étape de modélisation, nous avons pris l'ensemble des données utilisées pendant l'apprentissage et le test pour l'application de la régression linéaire multiple. Les résultats de cette démarche sont représentés dans la figure 70.

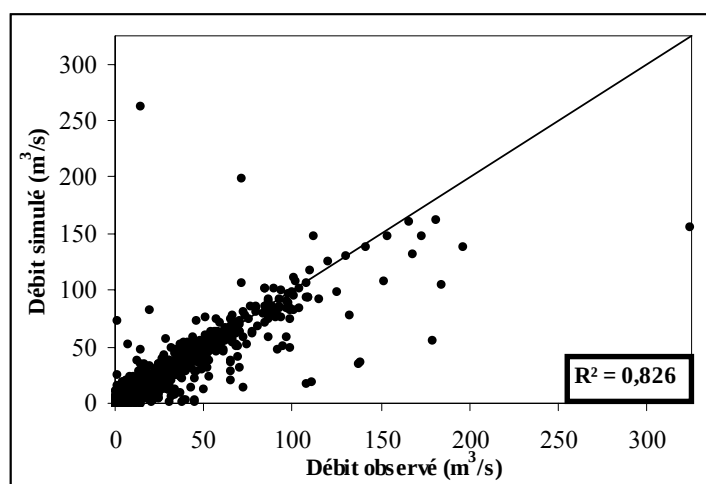


Fig. 70: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle de la Régression Linéaire Multiple RLM

Pour la deuxième étape de modélisation, les variables indépendantes sont : R_{t-1} , R_t , R_{t+1} , Q_{t-1} et Q_t , la variable dépendante est Q_{t+1} .

La figure 71 montre les résultats obtenus par le modèle de régression linéaire multiple (RLM). L'équation de régression obtenue est la suivante :

$$Q_{t+1} = 0.06 R_{t-1} + 0.147 R_t + 0.028 R_{t+1} + 0.016 Q_{t-1} + 0.882 Q_t \quad (37)$$

avec un coefficient de corrélation $R = 0.914$ ($R^2 = 0.8361$) sur l'ensemble des données utilisées dans le modèle du réseau de neurones artificiels.

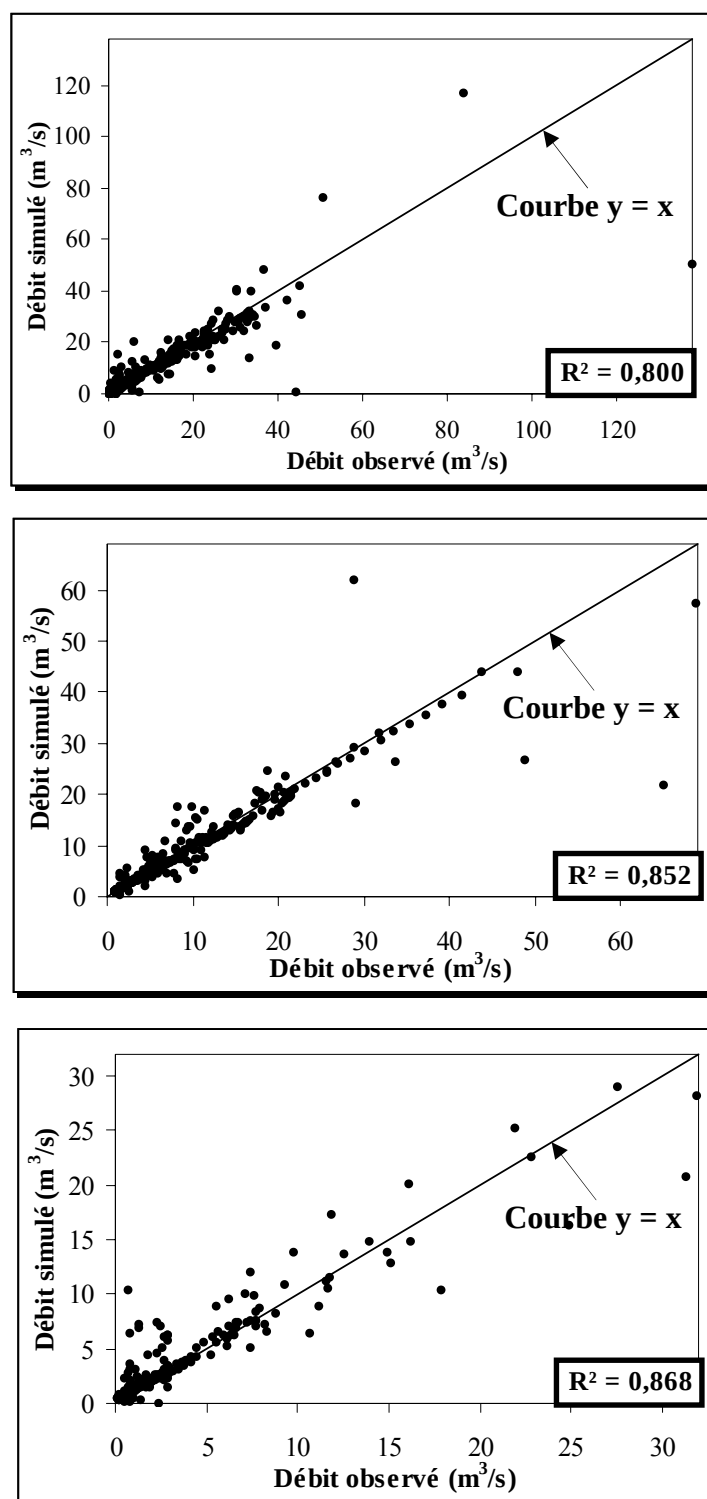


Fig. 71: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle de la Régression Linéaire Multiple RLM

Le tableau 21 illustre la comparaison des coefficients de corrélation entre les valeurs observées et les valeurs estimées obtenus par les deux modèles de prévision RNA et RLM. Les coefficients de corrélation indiquent la meilleure performance et convergence du modèle de réseaux de neurones par rapport à la régression multiple.

L'avantage du réseau neuronal est qu'à partir des variables exogènes on peut calculer plusieurs variables endogènes alors que la régression linéaire multiple ne permet de calculer qu'une seule variable endogène à la fois.

	Réseaux de neurones	Regression multiple
	R^2	
Phase d'apprentissage	0.9243	0.8002
Phase de Test	0.8802	0.8523
Phase de validation	0.8724	0.8684

Tab. 21: Comparaison des coefficients de corrélation obtenus pour les modèles de RNA et RLM

La modélisation par les réseaux de neurones artificiels indique une bonne corrélation entre les valeurs observées et les valeurs estimées. Il en découle que le modèle de RNA possède un meilleur pouvoir prévisionnel en comparaison avec les modèles classiques.

De nombreuses prévisions ont été effectuées afin de déterminer les horizons de ces prévisions par le modèle du réseau neuronal. En augmentant le temps de prévision ($t+2$, $t+3$ à $t+4$), on assiste à une diminution du coefficient de détermination R^2 entre les valeurs observées et celles estimées par ANN respectivement pour les phases de validation, de test et d'apprentissage (Fig. 72) et à une augmentation des erreurs ASE et MARE.

En conséquence, les critères de performance de RNA sont détériorés ce qui mène à une divergence du modèle en augmentant le temps de prévision des débits (Tab. 22).

	A $t+2$			à $t+3$			à $t+4$		
	R^2	ASE	MARE	R^2	ASE	MARE	R^2	ASE	MARE
Phase validation	0,811	0,000019	2,401%	0,670	0,000032	2,780%	0,606	0,000036	2,783%
Phase test	0,792	0,000078	0,360%	0,784	0,000083	0,462%	0,754	0,000096	0,459%
Phase apprentissage	0,685	0,000140	2,067%	0,574	0,000189	2,445%	0,545	0,000203	2,473%

Tab. 22: Comparaison des critères de convergence pour différentes périodes de prévision

La figure 73 montre la comparaison entre les débits simulés et observés pour la phase de validation pour des périodes de prévisions successives $t+2$, $t+3$ et $t+4$. On note une dispersion du nuage de points autour de la courbe $y = x$ en augmentant le temps de prévision et on enregistre une diminution de la corrélation entre les valeurs des débits simulés et observés. Les erreurs de prévisions s'accumulent en augmentant le temps de prévision des débits et par conséquent le modèle diverge.

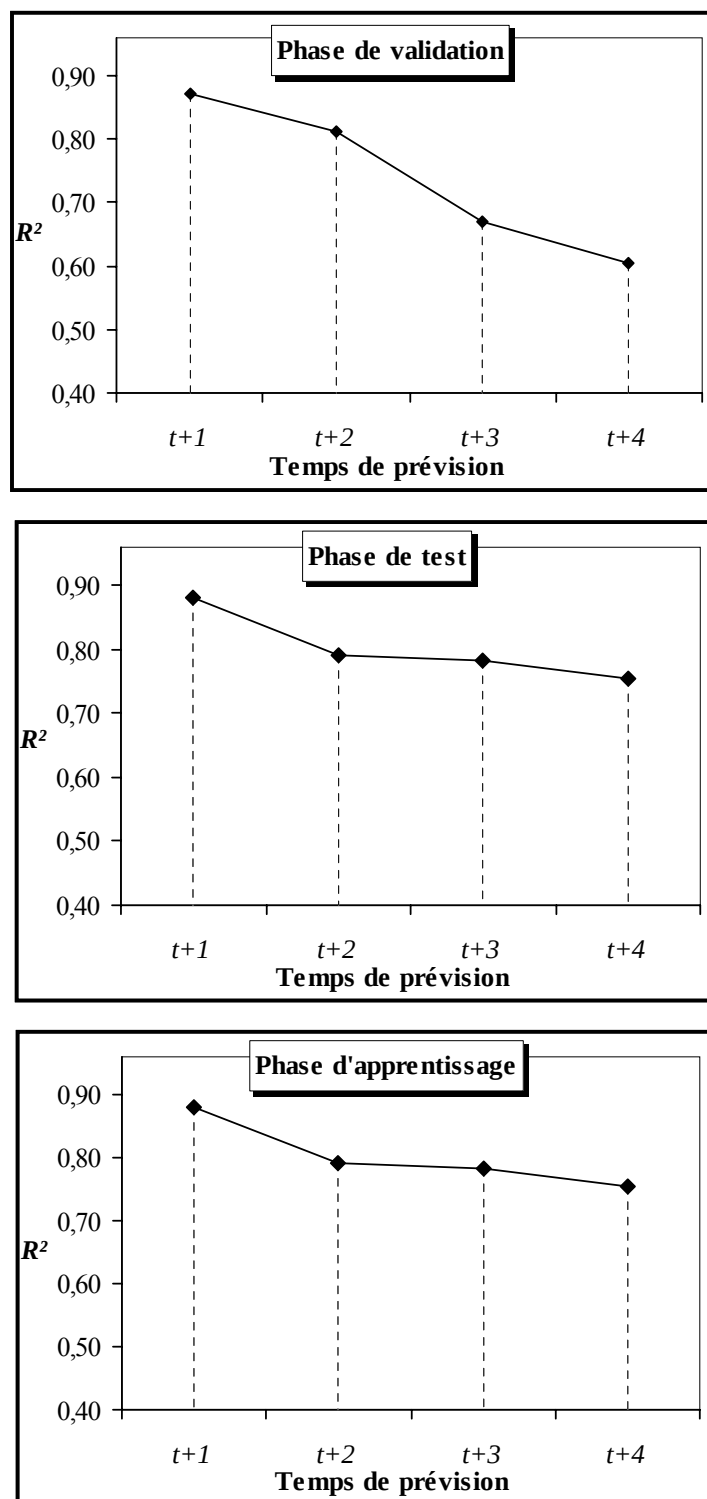


Fig. 72: Coefficient de détermination en fonction du temps de prévision

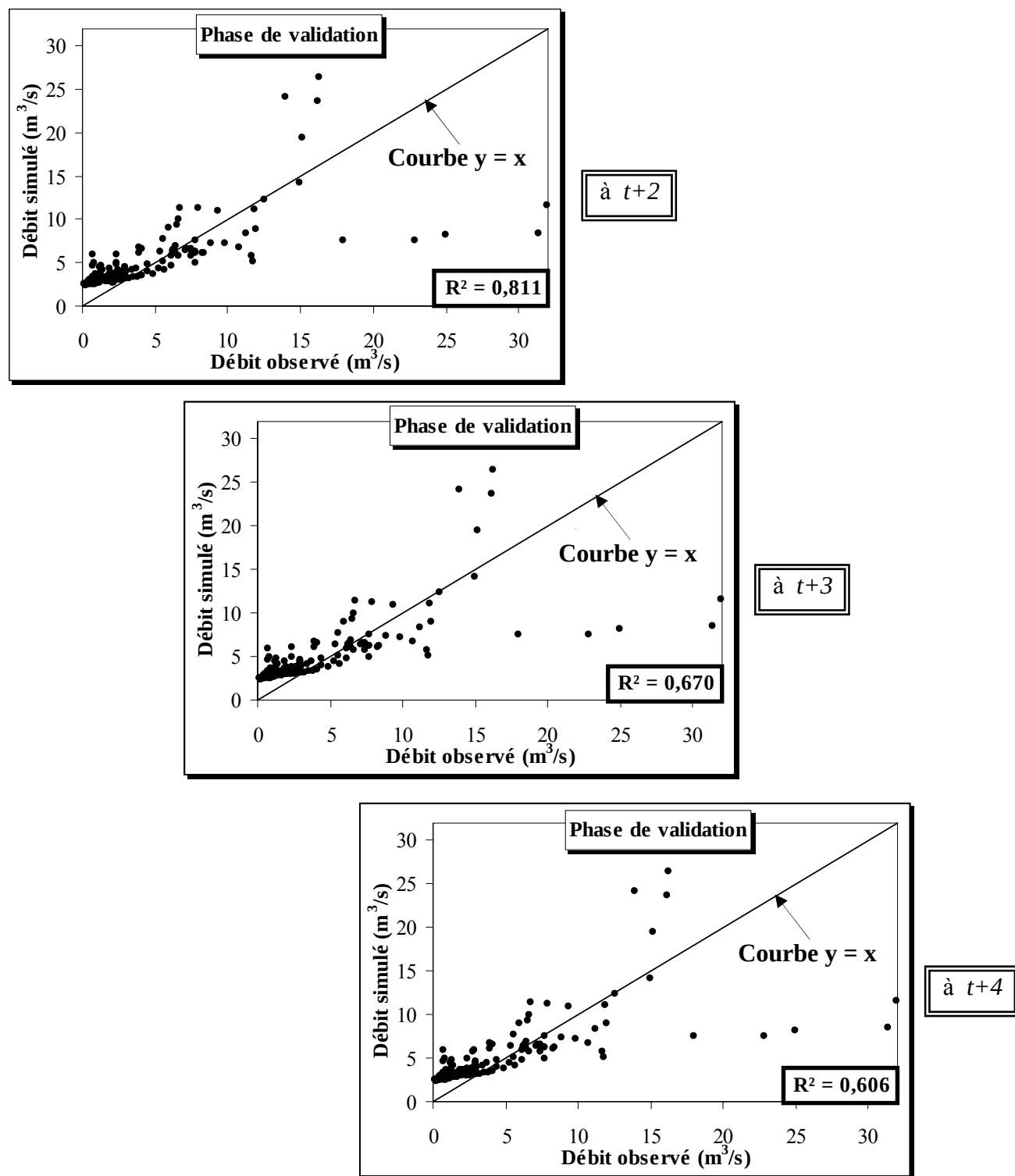


Fig. 73: Comparaison entre les débits simulés et observés à t+2, t+3 et t+4 pour la phase de validation

IV.4.4. Comparaison avec le bassin versant de l'oued Ansegrim

Le bassin versant de l'oued Ansegrim représente un sous bassin versant de l'oued Moulouya avec une superficie de 991 km² et une pluviométrie annuelle de 202 mm/ an (1960-1994). Il est situé dans un contexte géographique différent (se déverse dans la Méditerranée) que celui de l'oued Ourika (se déverse dans l'Atlantique). Il s'agit d'un système hydrologique qui possède des caractéristiques différentes d'écoulement affectant des zones alluvionnaires importantes.

Pour le choix des variables d'entrée du modèle qui participent à la prévision du débit, nous avons utilisé la même démarche que précédemment. Les résultats obtenus montrent que le minimum d'erreur de l'ASE pendant la phase de test est enregistré pour un nombre de dix années (1983 et 1992) pour la phase d'apprentissage avec un décalage de temps de 2 jours. Le test a été réalisé sur l'année 1993 et la validation effectuée sur l'année 1994.

Le nombre optimal de neurones dans la couche cachée est de 9 avec 1000 itérations. Ce qui correspond au modèle le plus performant avec un minimum d'erreur de ASE pendant la phase de test.

Le tableau 23 représente les valeurs de l'ensemble des paramètres statistiques pour la phase d'apprentissage, la phase de test et la phase de validation.

	ASE	R²	MARE
Apprentissage	0.000029	0.7152	2.563%
Test	0.000010	0.9361	3.773%
Validation	0.000013	<u>0.4192</u>	3.692%

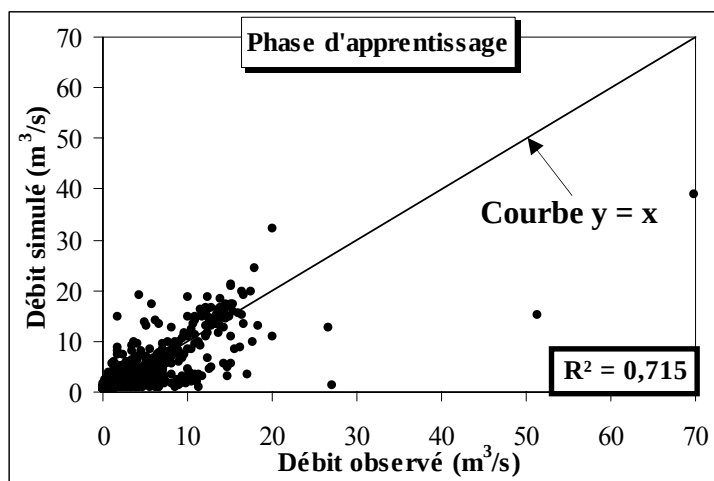
Tab. 23: Paramètres statistiques du modèle de réseau de neurones du bassin d'Ansegrim

ASE : Average Squared Error, R² : coefficient de détermination, MARE : Mean Absolute Relative Error

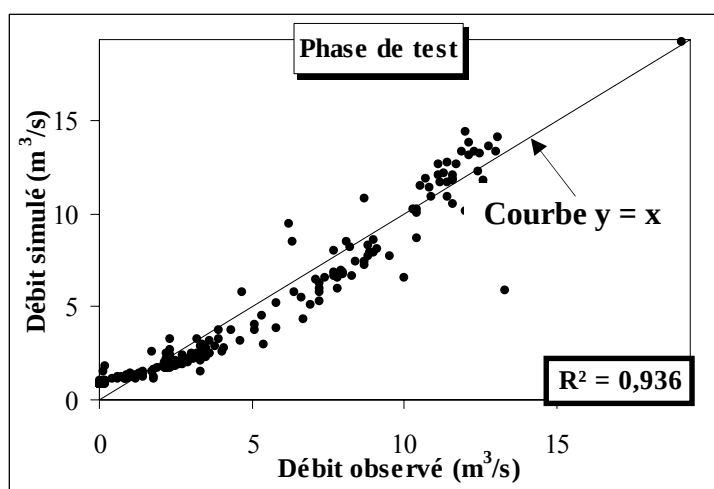
La figure 74 illustre les résultats de la prévision des débits de l'oued Ansegrim à $t+1$ respectivement pour la phase d'apprentissage, de test et de validation. A partir de ces résultats, on constate que le modèle montre une convergence moyenne par rapport au bassin de l'oued Ourika.

Pendant la phase de validation (1994), la corrélation entre les débits simulés et observés est moins bonne ($R^2 = 0.419$) due au fait qu'en 1994, il y avait des changements importants au niveau du bassin qui sont non contenus dans les données débitométriques et pluviométriques tels que les caractéristiques lithologiques, la végétation et d'autres paramètres physiques du bassin.

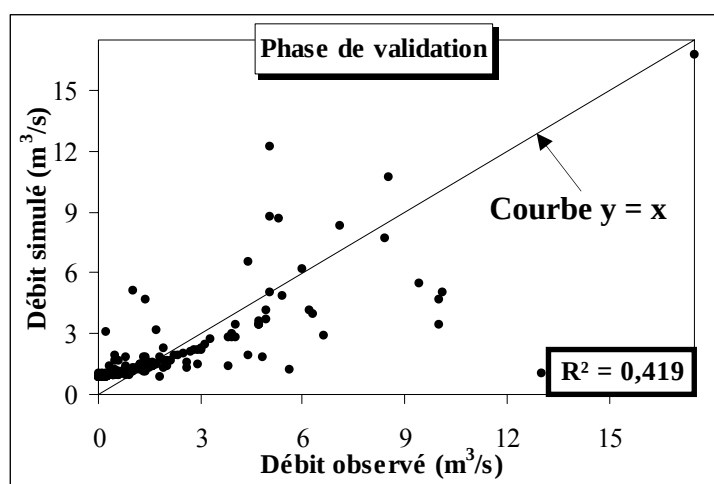
Pour les phases d'apprentissage et de test, cette corrélation est jugée satisfaisante puisque l'on enregistre respectivement $R^2 = 0.715$ et 0.936.



Paramètres statistiques	Débit observé (m^3/s)	Débit simulé (m^3/s)
Moyenne	1.69	1.94
Ecart type	3.01	2.54
Minimum	0	0.88
Maximum	69.8	39.17
Coefficient de variation	1.78	1.31



Paramètres statistiques	Débit observé (m^3/s)	Débit simulé (m^3/s)
Moyenne	2.99	3.1
Ecart type	3.78	3.54
Minimum	0	0.88
Maximum	19.1	19.34
Coefficient de variation	1.27	1.14



Paramètres statistiques	Débit observé (m^3/s)	Débit simulé (m^3/s)
Moyenne	1.19	1.63
Ecart type	2.39	2.09
Minimum	0	0.88
Maximum	17.8	20.69
Coefficient de variation	2.01	1.28

Fig. 74: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle pour les phases d'apprentissage, de test et de validation

IV.5. Conclusion

L'application du modèle des réseaux de neurones artificiels à des données pluviométriques et débitométriques journalières du bassin versant de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou permet d'obtenir de bonnes prévisions du débit à court terme (24 heures). Ce qui explique la haute performance du modèle dans la simulation des débits des oueds situés en climat semi-aride à aride.

Cette prévision, qui est basée sur des informations de débits et de pluies du passé et du présent, permettrait une meilleure gestion hydraulique afin de minimiser les risques d'inondation au sein du bassin versant étudié. Le modèle des RNA possède un bon pouvoir prévisionnel de type pluie-débit pour le système hydrologique étudié.

Le modèle de réseau neuronal a été appliqué aussi au bassin versant de l'oued Ansegmir qui présente des caractéristiques hydrologiques différentes afin de comparer les résultats obtenus de la modélisation pour la prévision des débits des oueds situés dans des contextes géographiques différents. Cette comparaison montre que le modèle de RNA réagit en fonction des informations contenues dans les données des débits et de pluies choisies comme des variables d'entrée du modèle sans une connaissance détaillée du système hydrologique.

Des applications de la méthodologie neuronale ont été faites pour d'autres bassins versants (Foum Tillicht et Ait Bouijjane) qui présentent de très faibles débits. Les résultats obtenus montrent que le modèle diverge avec une augmentation de l'erreur ASE et une très faible corrélation entre les débits observés et simulés (une valeur minime de R^2). Cette divergence est expliquée par la capacité du modèle RNA de faire des prévisions pour les forts à très forts débits (cas des inondations).

Les réseaux de neurones constituent, pour la plupart des bassins versants, la meilleure approche de modélisation pour la prédiction des débits.

V. CONCLUSION

Deux types d'approches mathématiques ont été utilisés dans la simulation et la prévision hydrologique : l'approche déterministe (ou conceptuelle) intégrant le modèle MERO (MMO8) à réservoirs pour la simulation numérique et l'approche empirique (ou stochastique) en utilisant le modèle des réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) pour la prévision des écoulements de surface.

L'originalité de ce travail de modélisation réside dans l'utilisation des réseaux neuronaux (approche connexionniste) qui sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexions des neurones, pour les prévisions des débits des bassins versants situés en zone semi-arides au Maroc.

L'application des deux modèles hydrodynamiques a montré de hautes performances dans la modélisation des écoulements de surface (simulation et prévision). Dans ce présent travail, l'application des modèles MERO et ANN au bassin versant de l'oued Ourika qui est un torrent de montagne, aboutit à des résultats qui sont plus prometteurs par la méthode neurale qu'avec le modèle à réservoirs.

L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. C'est pourquoi le choix et l'application d'un modèle neuronal demeure un domaine de recherche très actif contrairement aux modèles stochastiques classiques.

Par comparaison avec d'autres modèles plus classiques, les résultats obtenus indiquent que les modèles connexionnistes possèdent un meilleur pouvoir prévisionnel. Le recours à ces méthodes neuronales plus complexes constitue donc une alternative pleinement justifiée et privilégiée dans le domaine de la gestion prévisionnelle des ressources en eau de surface.

Le choix judicieux du vecteur d'entrée et de la taille du réseau (ou nombre total de couches et de neurones dans la couche cachée du réseau) constituent des étapes difficiles dans la définition de l'architecture d'un RNA, mais le choix de la structure du réseau (type d'interconnexion entre les couches de neurones) reste plus facile à effectuer parce qu'il n'existe que deux formes principales de structure : la forme dite "feedforward" et la forme récursive avec "feedback".

On note aussi qu'il existe une limite dans le temps des prévisions (horizons). En effet, les erreurs de prévisions s'accumulent en augmentant le temps de prévision des débits et par conséquent le modèle diverge. Cette divergence se traduit par une diminution du coefficient de corrélation obtenu entre les valeurs observées et calculées.

Malgré ces difficultés, la modélisation par les réseaux de neurones artificiels a abouti à des résultats satisfaisants dans la prévision des phénomènes hydrologiques. Ce type de modèle représente comme un moyen très puissant pour une gestion prévisionnelle des ressources en eau de surface en régions semi-arides particulièrement en période de crue.

D'un grand intérêt socio-économique, ce modèle RNA aide les décideurs à faire des bonnes prévisions de débit essentiellement à court terme comme dans notre cas (horizon des prévisions de 24 heures) et à les appliquer à d'autres systèmes hydrologiques de climat semi-aride où les risques d'inondation sont très répandus. Ces prévisions peuvent s'inscrire dans un projet d'aménagement permettant de prendre des précautions utiles par installation de barrages, de prévoir des transferts d'eau inter-bassins ou des recharges artificielles des nappes.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche repose sur l'analyse et la connaissance des caractéristiques hydrologiques au sein des différents bassins versants représentatifs situés à différentes altitudes en climat semi-aride du Maroc en utilisant de nombreux outils statistiques et certaines techniques de la modélisation des écoulements superficiels. Pour atteindre ces objectifs, on a fait appel à des bases de données climatologiques et hydrologiques interannuelles.

Le développement des différentes méthodes d'analyse statistique a permis une meilleure connaissance du régime hydrologique et du mode de fonctionnement des systèmes hydrologiques étudiés. En effet, l'étude multidimensionnelle à l'aide de l'analyse en composantes principales des données physiographiques permet de déterminer l'influence des caractéristiques physiques des bassins versants sur leur réponse hydrologique. L'ACP a mis en évidence les affinités entre les différents sous bassins versants, elle a donc permis de déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux et de les rattacher à des groupes distincts.

Les résultats de l'ACP nous ont permis le tracé des limites entre les différents ensembles physiques en regroupant les sous bassins versants appartenant à la même unité géomorphologique. L'examen des caractéristiques physiques de ces bassins versants a montré que ce sont surtout les caractéristiques de dimension qui régissent la répartition statistique des sous bassins versants.

L'AFD permet de diviser la population d'individus (sous bassins versants) en des groupes sur la base des valeurs des variables qui les caractérisent. L'analyse les affecte donc aux groupes auxquels ils se rapprochent statistiquement le plus.

On retrouve les groupes identifiés par l'ACP à l'exception du sous bassin versant (4) qui est plutôt réaffecté par l'AFD au groupe 2 (Bassin versant de la Moulouya) en raison des similitudes que présentent les deux bassins. Le pourcentage des bassins bien classés est en effet de 96.4%. Il ressort que l'AFD présente la même répartition que l'ACP.

Le modèle de la régression multiple met en évidence la forte corrélation entre les débits des oueds (variable dépendante) et les pluies ainsi que les divers paramètres physiques caractéristiques de chaque bassin versant étudié (variables indépendantes ou explicatives). L'analyse des corrélations entre les débits et les pluies montre un coefficient de corrélation linéaire r de l'ordre de 0.91. La détermination des paramètres physiques les plus pertinents qui influencent l'écoulement superficiel est ainsi nettement confortée par ce modèle statistique. Les résultats de la régression aboutissent à établir cette relation étroite ($r = 0.98$) qui existe entre le débit et les autres paramètres caractéristiques des bassins versants.

Le traitement statistique des séries chronologiques des débits et des pluies montre que le régime d'écoulement des différents oueds est très irrégulier. L'étude des débits des différents oueds a permis de caractériser le régime du ruissellement par la description de leur variation spatio-temporelle au cours des années d'observation. L'étude statistique des crues permet une estimation des débits extrêmes pour différentes périodes de retour.

L'analyse statistique des débits de pointe annuels observés aux différentes stations de mesure permet de représenter chaque débit en fonction de son temps de retour. Le temps de retour correspond à la période durant laquelle un débit est atteint ou dépassé en moyenne une fois.

Les ajustements effectués aboutissent à des résultats satisfaisants. L'oued Ourika à la station d'Aghbalou présente des débits plus irréguliers avec un coefficient de variation très élevé (1.28) ce qui permet d'expliquer le recours à la loi Log Normale (Méthode de Maximum de Vraisemblance). Quant aux autres bassins versants étudiés (Ansegmir, Foum Tillicht et Ait Bouijjane), les échantillons des données de débit de crue analysés s'adaptent mieux à la loi Gamma (Méthode des Moments).

L'analyse des séries chronologiques de pluie montre une alternance de périodes sèches et de périodes humides. Les précipitations sont caractérisées par une large variabilité aussi bien dans l'espace que dans le temps.

L'analyse corrélatoire et spectrale comme critère descriptif des chroniques de débit et de pluie nous a apporté de nombreuses informations sur la structure et le fonctionnement des systèmes hydrologiques étudiés pour déterminer la relation pluie-débit. L'ACS a mis en évidence les réserves des bassins hydrologiques étudiés. En effet, le bassin versant de l'oued Ansegmir à la station d'Ansegmir montre d'importantes réserves en eau souterraine. Le bassin versant de l'oued Ourika à la station d'Aghbalou présente un bon stockage en eau sur la seule période hivernale.

Le bassin versant de Ziz à la station de Foum Tillicht dispose d'une certaine réserve qui lui permet de régulariser son régime en période de basses eaux. Ceci permet aux années excédentaires de compenser les années déficitaires. Le système de Sidi Hamza est le siège de deux types d'écoulements : un écoulement de surface rapide (hydrogramme pointu) possédant un pouvoir régulateur faible, et un écoulement souterrain (hydrogramme étalé) avec un pouvoir régulateur important. Le bassin versant de l'oued Rhéris à la station d'Ait Bouijjane ne contrôle qu'une composante de l'écoulement à savoir l'écoulement de surface et il possède en profondeur un système de drainage très développé.

Cette analyse ACS a constitué une étape préliminaire importante à la modélisation des eaux superficielles. En effet, le modèle MERO a été appliqué au bassin versant de l'oued Ourika pour la période moyenne 1972-1973. Il nous a permis de quantifier la contribution de chaque unité hydrogéologique aux régimes des écoulements globaux. Les résultats de la simulation des débits sont jugés moyens, ils sont liés aux caractéristiques particulières du bassin essentiellement géographiques (zone montagneuse) et morphologiques (extension importante des formations granitiques altérées et fissurées avec des pentes très abruptes) qui donnent un aspect torrentiel aux valeurs de débit.

Le modèle de réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) à rétropropagation est une méthode originale utilisée pour les prévisions des débits des bassins versants situés en zones semi-arides. Cette méthodologie de modélisation a donné des résultats tout à fait significatifs pour le bassin versant de l'oued Ourika ($R^2 = 0.9243$; 0.8802 et 0.8724 respectivement pour l'apprentissage, le test et la validation).

Pour le bassin versant d'Ansegmir, on note une moyenne convergence du modèle qui se traduit par un coefficient de corrélation fort entre les débits simulés et observés pour la phase d'apprentissage et de test ($R^2 = 0.715$ et 0.936), mais relativement faible ($R^2 = 0.4192$) pour la phase de validation. Ceci est dû au fait que l'ensemble des données n'est pas représentatif des conditions du bassin et que l'information n'est pas contenue dans ces données mais en liaison avec la période de sécheresse de 1994 qui a modifié les mécanismes de ruissellement et d'infiltration des sols ainsi que du couvert végétal.

La modélisation par les réseaux de neurones artificiels pour la prévision des débits au niveau des exutoires des bassins versants donne des résultats cohérents et satisfaisants par rapport à d'autres méthodes classiques (modèle de régression multiple et à réservoirs) utilisées dans les régions à climat semi-aride ou aride. Ces prévisions sont jugées bonnes pour une période limite optimale de 24 heures, au-delà de cette limite, on assiste à une divergence du modèle RNA qui se traduit par une diminution du coefficient de corrélation.

Ce type de modèle pourrait être utilisé comme outil de prévision pour évaluer les risques d'inondation et donc pour tout aménagement hydraulique que ce soit à l'échelle régionale qu'à l'échelle nationale. Ce qui aboutit à un développement durable des ressources en eau et par la suite un grand intérêt socio-économique du pays.

Au terme de ce travail, quelques recommandations peuvent être proposées :

- * L'installation à différentes altitudes des stations de mesure hydrométriques et pluviométriques (en amont et en aval du bassin) permettrait une meilleure analyse des relations pluie-débit,
- * La mise en place et la mutualisation inter-services des bases de données pour les prévisions dans le cadre de la modélisation avec une meilleure infrastructure de réseaux de mesure et d'annonce de crue,
- * Etendre l'application de RNA à d'autres bassins versants en régions semi-arides où les inondations sont fortes et le combiner avec d'autres modèles hydrologiques,
- * La disposition d'une meilleure prise en considération des prévisions météorologiques permettant l'accès à des informations fiables en temps réel et renforcer le système de prévision par un réseau radars météorologiques.

La réalisation de ces infrastructures devrait ainsi faire face aux éventuels désastres naturels et par la suite contribuer à un développement socio-économique durable.

La gestion intégrée des ressources en eau est par ailleurs une composante essentielle de la stratégie de développement économique et social du pays. Elle implique une gestion décentralisée au niveau des bassins versants où tous les acteurs concernés apportent leur contribution effective à la maîtrise de la problématique de l'eau dans la perspective du développement durable du pays.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, M.B., J.C. Bathurst, J.A. Cunge, P.E. O'Connell & J. Rasmussen, J., (1986).** An Introduction to the European Hydrological System (Système hydrologique européen : SHE), Part 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87: 61-77.
- Achour, F. (1997).** Conditions hydrologiques et disponibilité en eau en région semi-aride : Application de méthodologie nouvelles au bassin du Chelif, Algérie. *Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté* (France), 249p.
- AGR/DDGI (1999).** Consolidations de la stratégie nationale en matière de réutilisation des eaux usées en agriculture, MADRPM/PNUD.
- Ahamrouni, J., (1996).** Erosion hydrique dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc Oriental). Recherche des zones sources d'envasement de la retenue du barrage Mohamed V. *Thèse de 3^{ème} cycle, FST, Dakar*, 148 p.
- Ambroise, B., (1991).** Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré - processus et modèles. *Séminaire du Conseil scientifique du Département "Science du Sol" de l'INRA à Dijon*.
- Ambroise, B., (1998).** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 1- Processus et facteurs. *Rev. Sci. Eau*, 11 (4) : 471-496.
- Ambroise, B., (1999).** Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 2- Modélisation systémique et dynamique. *Rev. Sci. Eau*. 12 (1) : 123-153.
- Amharef, A., (1991).** Contribution à l'étude hydrogéologique de la vallée du Ziz (Province d'Errachidia, Sud-Est du Maroc). Incidences respectives de la sécheresse et du barrage Hassan Addakhil sur les ressources en eau à l'aval. *Thèse Univ. Franche Comté, Besançon*, 232 p.
- ASCE Task Committee., (2000a).** Artificial neural networks in hydrology-I : preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE 5 (2) : pp. 115-123.
- ASCE Task Committee., (2000b).** Artificial neural networks in hydrology-II : hydrologic applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE 5 (2) : pp. 124-137.
- Barbut, M. et Foucoud, C., (1971).** Eléments d'analyse mathématique des chroniques. 208 p. Coll. *Hachette Université*, Librairie Hachette Ed.
- Beale, R., & Jackson, T., (1990).** Neural computing : an introduction. *IOP Publishing, Bristol*.
- Beaudeau, P., Leboulanger, T., Lacroix, M., Hanneton, S., Wang, H.Q., (2000).** Forecasting of turbid floods in a karstic drain using an artificial neural network. *Groundwater*, 39 (1), 109-119.
- Birtles, A. B (1978).** Identification and separation of major base flow components from a stream hydro. *Water Res. Research*, 14, n°15, pp. 791-803.
- Bishop, C.M., (1995).** Neural Networks for pattern Recognition, *Oxford University Press*, Oxford, 482.

- Bobée, B. & Ashkar, F., (1991).** The gamma family and derived distributions applied in Hydrology. *Water Resources Publications*, Littleton, Colo., Yevjevitch (Ed.) : 217 p.
- Bouchaou, L., Mangin, A. & Chauve, P., (2002).** Turbidity mechanism of water from a karstic spring: example of the Ain Asserdoune spring (Beni Mellal Atlas, Morocco). *Journal of Hydrology* 265, pp. 34-42.
- Bouroche, J.M. & Saporta, G. (1980).** L'analyse des données. 4^{ème} Ed., *Coll. Que sais-je?* Presse universitaires de France.
- Boutaleb, S. (2000).** Influence de la géologie et du climat des bassins versants sur la qualité des eaux d'une grande nappe alluviale en climat semi-aride : Application aux relations hydrologiques entre le Haut atlas et la plaine du Souss. *Thèse de 3^{ème} cycle, Université Ibnou Zohr, Faculté des sciences, Agadir.*
- Boutaleb, S., Hsissou, Y., Bouchaou, L., Mudry, J., Mania J. & Chauve, P. (1999).** Application des Analyses Corrélatoires et spectrales pour les systèmes hydrologiques de surface en zone semi-aride: cas de l'oued Issen (Haut Atlas Occidental, Maroc). 2^{ème} Col. *Int. Eau et Environnement*, février 99, *Fac. Sc. Agadir.*
- Box, G.E. & Jenkins, G.M., (1976).** Times series analysis. Forecasting and Control. Revised Edition. 575 p., *Holden-Day Ed.*
- Brockwell, P.J. & Davis, R. A., (1996).** Introduction to Times Series and Forecasting. 420. Coll. Springer Texts in Statistics, *Springer-Verlag Ed.*
- Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999).** River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research* 35 : 1191-1197.
- Chaire en hydrologie statistique., (2002).** INRS-ETE (Université du Québec), *HYFRAN*, Logiciel pour l'analyse fréquentielle en hydrologie, version 1.1.
- Chakraborty, k., Mehrotra, K., Mohan, C.K. & Ranka, S., (1992).** Forecasting the Behavior of Multivariate Time Series Using Neural Networks. *Neural Networks*, 5 : pp. 961-970.
- Chang, F.J. & Suen, J.P., (1997).** A study of the artificial neural network for rainfall-runoff process. *Journal of Chinese Agricultural Engineering*, 43 (1) : pp. 9-25. (In Chinese).
- Chang, F.J., Hu, H.F & Chen, Y.C., (2001).** Counterpropagation fuzzy-neural network for streamflow reconstruction. *Hydrological Processes*. 15, 219-232.
- Chang, F.J., Chang, L.C & Huang, H.L., (2001).** Real-time recurrent learning neural network for stream-flow forecasting. *Hydrological Processes*. 16, 2577-2588.
- Chen, S., Billings, S.A. & Grant, P.M., (1990).** Non-linear system identification using neural networks. *Int. J. Control*, 51 (6) : pp. 1191-1214.

- Coulibaly, P., Anctil F et Bobée B., (1999).** Préviation hydrologique par réseaux de neurones artificiels : état de l'art. *Revue canadienne de génie civil*, 26 (3) : pp. 293-304.
- Coulibaly, P., Anctil, F. et Bobée B., (2000).** Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training approach. *Journal of Hydrology*, 230 : pp. 244-257.
- Coulibaly, P., Bobée, B., & Anctil., F., (2001).** Improving extreme hydrologic events forecasting using a new criterion for artificial neural network selection. *Hydrol. Process.* 15, 1533-1536.
- Cubero, R.G., (1991).** Neural Networks for Water Demand Time Series Forecasting. In : Artificial Neural Networks, *Proceedings of the international Workshop IWANN'91*, A. Prieto Ed., Springer-Verlag, Germany, pp. 453-460.
- Cybenko, G., (1989).** Approximation by superposition of sigmoidal functions, *Mathematics of control, signals and systems*, 2, pp. 303-314, pp. 377-403.
- Dan, A., Oosterbaan, J, et Jamet, P., (2002).** Contribution des réseaux de neurones artificiels (RNA) à la caractérisation des pollutions de sol. Exemples des pollutions en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). *C. R. Geoscience*, Paris. 334, 957-965.
- Dastorani, M.T. & Wright, N.G., (2002).** Artificial neural network based real-time river flow prediction. *Hydroinformatics* : Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics, Cardiff, UK.
- Dawson, C.W. and Wilby, R.L., (1998).** An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 43 (1), pp. 47-66.
- Dawson, C.W. and Wilby, R.L., (2000).** A comparison of artificial neural networks used for rainfall-runoff modelling. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 3, pp. 529-540.
- Dawson, C.W. and Wilby, R.L., (2001).** Hydrological modeling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 25, pp. 80-108.
- Dayhoff, J.E., (1990).** Neural network architectures. *Van nostrand reinhold*, New York.
- Degallier, R., (1972).** Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : Le modèle SMERO. *Bull. BRGM*, sect. III, n°3, pp. 23-42.
- Dimopoulos, I., Lek, S. et Lauga, J., (1996).** Modélisation de la relation pluie-débit par les réseaux connexionnistes et le filtre de Kalman. *Journal des sciences hydrologiques*, 42 (2) : pp. 179-193.
- Dubois, J., (1995).** La dynamique non linéaire en physique du globe. 265 p. Coll. Géophysique interne, Masson Ed.
- Durand, D., (1979).** La systématique. 125 p. Coll. Que sais-je ? P. U. F. Ed.
- El Adlouni, S., (2002).** Etude des estimateurs des paramètres de la loi Halfen type A. Application : Estimation des débits de crue. *Thèse de 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Rabat*, 81 p.

- El Adlouni, S., Bouziane, A. & El Hassnaoui, D., (1999).** Estimation du débit de période de retour par la méthode de maxima annuels, application à des bassins versants marocains. *Journées d'Hydrologie à Tunis* (ENIT), Tunisie.
- El Ouali, A., (1992).** Contribution du Haut Atlas central au Sud de Midelt à l'alimentation des aquifères profonds du bassin crétacé d'Errachidia (Maroc). *Doct. Univ. Franche-Comté, Besançon*, 234 pp.
- Elshorbagy, A., Simonovic, S.P. & Panu, U.S., (2000).** Performance evaluation of artificial neural networks for runoff prediction. *ASCE Journal of hydrologic Engineering* 5 (4), 242-427.
- Fortin, V., Ouarda, T., Rasmussen, T.P. et Bobée, B., (1997).** Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits. *Revue des Sciences de l'Eau*, 4 : pp. 461-487.
- French, M.N., Krajewski, W.F. and Cuy-Kendall, R.R., (1992).** Rainfall forecasting in space and time using a neural network. *Journal of hydrology*, 137 : pp. 1-31.
- Gallant, S.I., (1993).** Neural Networks Learning and Expert Systems. MIT Press : *Cambridge* ; 365 pp.
- Gamal El-Din, A et Daniel W. Smith., D.W., (2002).** A neural network model to predict the wastewater inflow incorporating rainfall events. *Water Research*. 36, 1115-1126.
- Gautam, M.R., Watanabe, K. et Saegusa, H., (2000).** Runoff analysis in humid forest catchment with artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 235, 117-136.
- Halff, A.H., Halff, H.M. and Azmoodeh. M., (1993).** Predicting Runoff from Rainfall using Neural Networks. In *Engineering Hydrology*, Kuo CY (ed.). Proceedings of the Symposium sponsored by the Hydraulics Division of ASCE, San Francisco, CA, July 25-30, 1993. ASCE: New York; pp. 760-765.
- Hall, M.J and Minns, A.W., (1993).** Rainfall-runoff modelling as a problem in artificial intelligence : Experience with a neural network. In : *Proc. BHS 4 National Hydrology Symposium*, Cardiff, pp. 5.51-5.57.
- Haykin, S., (1994).** Neural Networks : a comprehensive foundation. Macmilan College *Publishing Company*, New York.
- Haykin, S., (1996).** Neural Networks a comprehensive foundation, Prentice Hall.
- Hecht-Nielsen, R., (1988).** Neurocomputing : Picking the human brain, *IEEE Spectrum*, 25 (3), March 1988, pp.36-41.
- Hecht-Nielsen, R., (1989).** Neural Network primer : part I, *AI Expert*, Feb.
- Hecht-Nielsen, R., (1990).** Neuro-computing, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA. Solution for a distributed hydrological model and applications, pp. 89-93.
- Holder, L., (1985).** Multiple regression in hydrology. *Institute of hydrology*, Wellingford.

- Hoptroff, R.G., (1993).** The principles and practice of time series forecasting and business modelling using neural nets. *Neural Comput. & Applic.*, 1 : pp. 59-66.
- Hornik, K., Stinchcombe, M & White, H., (1989).** Multilayer feedward networks are universal approximators, *Neural Networks* 2, pp. 359-366.
- Horton, R.E. (1932).** Drainage basins characteristics. *Tran.am.Geophys.Union*, vol. 13.
- Hsu, K.L., Gupta, H.V & Sorooshian S., (1995).** Artificial neural network modelling of the rainfall-runoff process. *Water Resour. Res.* 31 (10), pp. 2517-2530.
- Hu, T.S., Lam K. C and Ng, S.T., (2001).** River flow time series prediction with a range-dependent neural network. *Hydrological Science Journal*, 46 (5) : pp. 729-745.
- Imrie, C.E., Durucan, S. and Korre, A., (2000).** River flow prediction using artificial neural networks: generalisation beyond the calibration range. *Journal of Hydrology*, Volume 233, Issues 1-4, pp. 138-153.
- Jemali, A et Kefati, A., (2002).** Réutilisation des eaux usées au Maroc. *Forum sur la gestion de la demande en eau*.
- Jenkins, G.M. and Watts, D.G., (1968).** Spectral analysis and its applications. *Ed Holden-Day, San Francisco, Californie.*, 525 p.
- Johson, V.M. & Rogers, L.L., (2000).** Accuracy of neural network approximators in simulation-optimisation. *J. Water ressour. Planning and Management*. 48-56.
- Kabbaj, A. et Combe, M., (1977).** Ressources en eau du Maroc. Domaines atlasiques et sud atlasiques. Tome 3, *Notes et Mém. Sev. Géol. N°231*, Rabat, Maroc.
- Kang, K.W., Park, C.Y. & Kim, J.H., (1993).** Neural network and its application to rainfall-runoff forecasting. *Korean Journal of Hydrosience* 4, 1-9.
- Karunanithi, N., Grenney, W.J., Whitley, D. & Bovee, K., (1994).** Neural networks for river flow prediction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE 8 (2) : pp. 201-220.
- Khrabcha, A., (1999).** Proposition d'un plan d'aménagement de la vallée de l'Ourika suite à la crue du 17 Août 1995 par l'élaboration d'une base de données multisources (Haut Atlas de Marrakech). *Thèse de 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Rabat*, 287 p.
- Kolmogorov, A.N., (1963).** On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition. *American Mathematical Society Translation*, 28 : 55-59.
- Kunt, M., (1981).** Traitement numérique des signaux. 402 p. Dunod Ed.
- Laborde, J.P., (1982).** Eléments d'hydrologie de surface. Tome 2 : Critique et analyse statistique des données hydrologiques. *Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/ Inst. Nat. Polytech. De Lorraine*, 95 p.

- Lachtermacher, G., & Fuller, J.D., (1994).** Backpropagation in hydrological time series forecasting. In : K. W. Hipel, A.I. MacLeod, U.S. Panu & V. P. Singh (eds), *Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering*, Vol. 3, Time series analysis in *hydrology and environmental engineering* : 229-242.
- Lallehem, S., (2002).** Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de paris. *Thèse univ. Lille1*, 219p.
- Lallehem, S. & Mania, J., (2002a).** A linear and non-linear rainfall-runoff models to evaluate aquifer outflow. *Tribune de l'Eau*. N°1, Vol. 55, N° 615.
- Lallehem, S. & Mania, J., (2002).** A linear and non-linear rainfall-runoff model using neural network technique : Example in fractured porous media. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*. N°1, Vol. 55, N° 615.
- Lallehem, S., (2002g).** Evaluation and forecasting of daily groundwater inflow in a small chalky watershed. *Hydrol. Process*. 17, 1561-1577.
- Le Gallo, F. & Bouchon-Meunier, B., (1992).** Systémique-Théorie et applications. 341 p., Tec et Doc Ed.
- Lek, S., Dimopoulos, I., Derraz, M. & El Ghachtoul, Y., (1996).** Modélisation de la relation pluie-débit à l'aide des réseaux de neurones artificiels. *Rev. Sci. Eau*. 9 (3) : 319-331.
- Levine, B., (1973).** Fondements théoriques de la radiotechnique statistique, Vol. 1. *Mir, Moscou*, 584 pp.
- Lippmann, R.P., (1987).** An Introduction to Computing with Neural Nets. *IEEE ASSP Magazine*, April 1987, 4 (2), 4-22.
- Lischeid Gunnar and Uhlenbrook Stefan., (2003).** Checking a process-based catchment model by artificial neural networks. *Hydrol. Process*. 17, 265-277.
- Lorrai, M. and Sechi, G.M., (1995).** Neural Nets for Modelling Rainfall-Runoff Transformations, In : *Water resources management*, Vol. 9, pp. 299-313, 1995.
- Luk. Kin, C., Ball, J.E. and Sharma, A., (2001).** An application of artificial neural networks for rainfall forecasting, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol 33, Issues 6-7 : pp. 683-693.
- Maier, H.R. and Dandy, G.C., (1996).** The use of artificial neural network for the prediction of quality water parametrers. *Water Ressources Research*, 32 (4) : pp. 1013-1022.
- Mangin, A., (1975).** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Thèse Doct. Sc., Université de Dijon, Dijon* (Ann. Spéleol., 1974, 29 (3) : 283-323 ; 1974 29 (4) : 495-601 ; 1975 30 (1) : 21-124).
- Mangin, A., (1981a).** Utilisation des analyses corrélatoires et spectrales dans l'approche des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sc., Paris*, t. 293, série II, n°5, pp. 401-404.

- Mangin, A., (1981b).** Apports des analyses corrélatoires et spectrales croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. *C.R. Acad. Sc., Paris*, t. 293, série II, n°14, pp.1011-1014.
- Mangin, A., (1982a).** Mise en évidence de l'originalité et de la diversité des aquifères karstiques. 3^{ème} *Coll. d'Hydrologie en pays calcaires*, 7-10 Octobre 1982, Neuchâtel. Ann. Sci. Univ. Besançon, Mémoire n°1, pp. 159-172.
- Mangin, A., (1982b).** L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. *Réunion monografica sobre et karst. LARRA-ISABA-NAVARRA*, 4 au 11 Novembre 1982. Pp. 141-147.
- Mangin, A., (1984).** Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *Journal of hydrology*, 67, pp. 25-43.
- Mangin, A., (1988).** Réflexion sur les mécanismes de l'infiltration dans les karsts à partir de l'exemple de Niaux (Ariège, France). *Bull. Centre d'Hydrogéol.* Neuchâtel, n°8, pp. 3-25.
- Mania, J., (1977).** Contribution à l'étude des systèmes aquifères, leur influence sur la gestion des ressources en eau dans le Nord de la France. *Thèse Doct. Es Sc. Lille*, 325 p, 163 fig.
- Mania, J., Focquenoey-Niemczyk, E. J., Ramon, S., & Verbeke B., (1982).** Caractérisation de la réponse des diverses unités hydrogéologiques calcaires du Nord de la France. *Ann. Sc. De l'université de Franche-Comté*, Fsc. 4, 4^{ème} série, 1982, pp. 27-36.
- Mason, J.C., Price, R.K. & Tem'me, A., (1996).** A neural network model of rainfall-runoff using radial basis functions, *Journal of hydraulics Research*, Vol. 34, N° 4, IAHR, pp. 537-548.
- Masood-Ul-Hassan, K., Minns, A.W. & Yde, L. (1995).** Application of artificial neural network to real-time control of hydraulic structures, *Advances in intelligent Data Analysis*, Lasker, G. and Liu, X. (eds), IIAS Press, pp. 114-118.
- Max, J., (1980).** Traitement du signal et applications aux mesures physiques. Principes et appareillages de traitement en temps réel. 379 p. *Paris, Masson Ed.*
- McCulloch, W.S. and Pitts, W., (1943).** A logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: pp. 115-133.
- Mero F. & Gilboao Y. (1974).** A methodology for the rapid evaluation of ground water resources, Sao Paulo Stat, Brasil. *Hydrol. Sc. Bull.*, XIX, 3, 9, p. 347- 358.
- Mero F., (1978).** The MMO8 hyrometeorological simulation system. Basic concepts and operators guide. *Rep. Tahal Cons. Eng.* Israël, 18 p.
- Messaoudi, A. & Chikri, N., (1994).** Crues de la Moulouya du 11 au 17/11/93. *Eau et Développement*. DRPE, Rabat, pp. 54-58.
- Minns, A.W and Hall M.J., (1996).** Artificial neural networks as rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal* 41 (3) : pp. 399-418.

- Minns, A.W. & Hall, M.J., (1997).** Living with the ultimate black box : more on artificial neural networks, *Proc 6th Nat. Hydrol. Symp.*, Salford, British Hydrological Society, London, pp. 9.45-9.49.
- Minns, A.W., (1998).** Artificial Neural Networks as Subsymbolic Process Descriptors. *A.A. Balkema, Rotterdam/ Brookfield*. 124 p.
- Musy, A. & Laglaine, V. (1992).** Hydrologie générale. *Cours polycopié, section génie rural, environnement, mensuration*, EPFL, Lausanne.
- Musy, A. & Higy, C. (1999).** Hydrologie appliquée. *Cours polycopié, section génie rural, environnement, mensuration et génie civil*, EPFL, Lausanne.
- Najjar, Y., Basheer, I.A. and Imad, A., (1996).** Utilizing Computational Neural Networks for Evaluating the Permeability of Compacted Clay Liners, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 193-212.
- Najjar, Y., Basheer, I.A and Hajmeer, M.N., (1997).** Computational neural networks for predictive microbiology : Methodology. *International Journal of Food Microbiology* 34, pp. 27-49.
- Najjar, Y and Ali, H., (1998a).** On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. Artificial Intelligence and Mathematical Methods in *Pavement and Geomechanical Systems*, Attah-Okin (Editor): pp. 55-63.
- Najjar, Y. and Ali, H., (1998b).** CPT-Based Liquefaction Potential Assessment : A Neuronet Approach. *ASCE Geotechnical Special Publication* No.75, Dakoulas, P. et. Al. (Editors), (1) : pp. 542-553.
- Najjar, Y. and Zhang, X., (2000).** Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. *ASCE Geotechnical Special Publication* No. 96, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors) : pp. 43-57.
- Osaki, T., (1980).** On a model of a non linear feedback system for river flow prediction. *Water Resour. Res.*, 16 (1) : pp. 225-231.
- Persson, M., Sivakumar, B., Berndtsson, R., Jacobsen, O.H. and Schjønning, P., (2002).** Predicting the dielectric constant-water content relationship using artificial neural networks. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, pp. 1424–1429.
- Piqué, A., (1994).** Géologie du Maroc : Les domaines régionaux et leur évolution structurale – *Hist. Géol. Maroc*, 284 p.
- Rahali, H., (1996).** Caractérisation des ressources en eaux d’une région semi-aride située au Sud-Est de Marrakech, Maroc, par l’utilisation des données satellites et autres dans un système d’information géographique. *Thèse es science. Fac. Science de Gand*.

- Reed, R.D & Marks, R.J., (1998).** Neural Smithing. Supervised learning in feedforward Neural Networks. *A Bradford Book MIT Press*.
- Refregier, P., (1993).** Théorie du signal - Signal-Information-Fluctuations. 278 p. Coll. Enseignement de la physique, Masson Ed.
- Refsgaard, J.C., Seth, S.M., Bathurst, J.C., Erlich, M., Storm, B., Jorgensen, G.H. and Chandra, S., (1992).** Application of SHE to catchments in India, Part 1. General results, *Journal of hydrology*, N°. 140, pp. 1-23.
- Riad, S., Bobée B., Ouarda T., El Youssi M., Bouziane A. et Hasnaoui, D., (1999).** Estimation régionale des débits de crue : Détermination des régions homogènes par la méthode de Burn ou des régions d'influence, application à des bassins versants marocains. *Journées d'Hydrologie à Tunis* (ENIT), Tunisie.
- Riad, S., Mania, J. et Bouchaou, L., (2001).** Analyse hydrologique et caractéristiques physiques de quelques bassins versants en zone semi-aride (Maroc). *1^{er} Colloque National d'Hydrogéologie et Environnement*. Fès, Maroc.
- Riad, S., Mania, J. et Bouchaou, L., (2002).** Analyse de la variabilité hydroclimatique dans les sous bassins versants de Tensift (Maroc). *19^{ème} Colloque international de la Géologie Africaine*. El Jadida, Maroc.
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L. et Najjar, Y., (2003).** Artificial Neural Networks Models for River inflow Prediction. *Tribune de l'eau*. (sous press).
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L. et Najjar, Y., (2003).** Modélisation de la relation pluie-débit par les réseaux de neurones artificiels (RNA ou ANN) : Application a un bassin versant en zone semi-aride (Maroc). *Colloque international sur l'Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides*. Montpellier, France.
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L. et Najjar, Y., (2003).** Predicting catchment flow in semiarid region via artificial neural network technique. *Hydrol. Process*. (sous press).
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L. et Najjar, Y., (2003).** Neural Network Models of Rainfall-Runoff Process. *Journal of Mathematical and Computer Modelling* (sous press).
- Riad, S., Mania, J. et Bouchaou, L., (2003).** Variabilité hydroclimatique dans les bassins versants de du Haut Atlas de Marrakech (Maroc). *Revue de Sécheresse*. (sous press)
- Roche, M., (1963).** Hydrologie de surface. *Gauthier-Villars Editeur-Paris*, 429 p., 204 fig.
- Roddier, F., (1985).** Distributions et transformation de Fourier à l'usage des physiciens et des ingénieurs. 323 p., McGraw Hill Ed.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. and Williams, R.J., (1986).** Learning internal representations by back-propagation error. *Nature*, 323 : pp. 533-536.

- Rumelhart, D.E., Widrow, B. and Lehr, M.A., (1994).** The basic ideas in neural networks. *Communications of the ACM*, 37 (3) : 87-92.
- Sajikumar, N. and Thandaveswara, B. S., (1999).** A non-linear rainfall-runoff model using an artificial neural network. *Journal of Hydrology*, Volume 216, Issues 1-2, 8 March 1999, pp. 32-55.
- Sankarasubramannian, A. and Vogel, R.M., (2002).** Basin hydrologic response relations to distributed physiographic descriptors and climate. *Journal of Hydrology*, Vol. 263, 257-261.
- Saidi, M.E. et Daoudi, L., (2000).** Risques naturels dans le Haouz de Marrakech. Exemples des crues de l'Ourika de Ghiraia et de N'Fis. *Colloque international des Chaires maghrébines Unesco-Gas Natural*. Université Mohammed V, Rabat, 27-29 avril 2000, p. 9.
- Saidi, M.E., (1994).** Genèse et propagation des crues en milieu sub-aride, exemple d'oued Souss (Maroc). *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, Paris, 18 p.
- Saidi, M.E., (1995).** Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss (Maroc). *Thèse de l'université de Paris IV*, 120 p.
- Smith, M., (1993).** Neural Networks for Statistical Modelling, *Van Nostrand Reinhold*, New York.
- Smith, J. & Eli, R.N., (1995).** Neural Network Models of Rainfall-Runoff Process. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121 (6) : pp. 499-509.
- Shamseldin, A.Y., (1997).** Application of a neural network technique to rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology* (Amsterdam), 199 : pp. 272-294.
- Sherman, L.K., (1932).** Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engineering News Record*, 108, 501-505.
- Sivakumar, B., Jayawardena, A.W. and Fernando, T. M. K. G., (2002).** River flow forecasting : use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches, *Journal of Hydrology*, Volume 265, Issues 1-4, 30 August, pp. 225-245.
- STATSOFT France (1997).** STATISTICA pour Windows [Manuel du Programme]
- Sudheer, K.P., Gosain, A.K. & Ramasastri, K.S., (2002).** A data-driven algorithm for constructing artificial neural network rainfall-runoff models. *Hydrol. Process.* 16, 1325-1330.
- Sudheer, K.P., Gosain, A.K., Mohana Rangan, D & Saheb, S.M., (2002).** Modelling evaporation using an artificial neural network algorithm. *Hydrol. Process.* 16, 3189-3202.
- Sudheer, K.P., Nayak, P.C. & Ramasastri K.S., (2003).** Improving peak flow estimates in artificial neural network river flow models. *Hydrol. Process.* 17, 677-686.
- Supharatid, S., (2003).** Application of a neural network model in establishing a stage-discharge relationship for a tidal river. *Hydrol. Process.* (in press).

- Thiria, S., Mejia, C., Badran, F & Crépon, M., (1993).** A neural approach for modelling nonlinear transfer function : application for wind retrieval from spaceborne scatterometer data. *Journal of Geophysical research*, 98, C12, 22, 827-22, 841.
- Tang, Z. and Fishwick, P.A., (1993).** Feedforward neural nets as models for time series forecasting, *ORSA Journal of Computing*, Vol. 5, N° 4, pp. 374-385.
- Tokar, A.S., (1996).** Rainfall-runoff modelling in an uncertain environment. *PhD thesis. University of Maryland. UMI Dissertation Service. Bell-Howell Company.*
- Tokar, A.S and Johson, P.A., (1999).** Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks. *J. Hydrologic Engineering*, ASCE 4 (3), pp. 232-239.
- Uvo, C.B., Tölle, U. and Berndtsson, R., (2000).** Forecasting discharge in Amazonia using neural networks. *Int. J. Climatol.* 20, pp. 1495-1507.
- Vaziri, M. (1997).** Prediction of Caspian sea surface water level by ANN and ARIMA models. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers 123 (4) : 158-162.
- Ventsel, H., (1973).** Théorie des probabilités. *Mir, Moscou*, 563 pp.
- Wei, Y.M., (1995).** A study on neural network based expert system for mining method selection. *Journal of Computer Applications and Software*, 12 (5), 51-57 (in Chinese).
- Wei, Y., Xu, W., Fan, Y. & Tasi, H.T., (2002).** Artificial neural network based predictive method for flood disaster. *Computers & Industrial Engineering*, 42, 383-390.
- Wen, X.H., (1994).** Time series neural network forecasting method. *Journal of Electronics*, 16 (5). 456-462. (in Chinese).
- Wen, C.G. & Lee, C.S., (1998).** A neural network approach to multiobjective optimization for water quality management in a river basin. *Water Resources Research*, 34 (3) : pp. 427-436.
- White, H., (1992).** Artificial neural networks : approximation and learning theory. Vols. 16-18. Cambridge. MA : Blackwell.
- World Meteorological Organisation (WMO) (1975).** Inter-comparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting, World meteorological Organisation, *Technical report* N° 429, Geneva, Switzerland.
- World Meteorological Organisation (WMO), (1994).** Guide to hydrological practices. *WMO-N° 168*, Genève, Suisse.
- Wright, N.G., Dastorani, M.T., Goodwin, P & Slaughter, C.W., (2002).** A combination of neural networks and hydrodynamic models for river flow prediction. *Hydroinformatics* : Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics, Cardiff, UK.

- Xu, Z. X. & Li, J. Y. (2002).** Short-term inflow forecasting using an artificial neural network model. *Hydrol. Process.* 16, 2423-2439.
- Yang, L., (1996).** An adaptive modeling and forecasting approach of time series based on neural network. *Journal of Decision Making and Decision Support system*, 6 (2), 69-75.
- Zealand, CM., Burn, DH. & Simonovic, SP., (1999).** Short term streamflow forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* 214 : 32-48.
- Zhang, S.P., Watanabe, H. & Yamada, R., (1994).** Prediction of daily water demands by neural networks. In *Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering*. Vol. 3. Éditeurs: K.W. Hipel, A.I. McLeod, U.S. Panu et V.P. Singh. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollande. Pp. 217-227.
- Zhang, X., (1994).** Time series analysis and prediction by neural networks. *Optimization Methods and Software* 4, pp. 151-170.
- Zhang, Q. & Stanley, S.J., (1997).** Forecasting raw-water quality parameters for the North Saskatchewan River by neural network modelling. *Water Resources Research*, 31 (9) : pp. 2340-2350.
- Zhu, M.L. & Fujita, M., (1994).** Comparaisons between fuzzy reasoning and neural networks methods to forecast runoff discharge. *Journal of Hydroscience and hydraulic Engineering* 12 (2), 131-141.
- Zurada, J.M., (1992).** Introduction to artificial neural systems. *West Publishing Co.*, Saint Paul, Minnesota.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

<i>Fig. 1: Répartition de la pluviométrie moyenne annuelle au Maroc</i>	15
<i>Fig. 2: Répartition des ressources en eau de surface du Maroc</i>	16
<i>Fig. 3: Répartition des ressources en eau mobilisées</i>	17
<i>Fig. 4: Répartition géographique des ressources en eau de surface</i>	18
<i>Fig. 5: Situation géographique des différents bassins versants étudiés à l'échelle du Maroc</i>	24
<i>Fig. 6: Situation géographique du bassin versant de la Moulouya</i>	25
<i>Fig. 7: Situation géographique des bassins côtiers méditerranéens</i>	26
<i>Fig. 8: Situation géographique du bassin versant de Tensift</i>	27
<i>Fig. 9: Situation géographique des bassins versants de Ziz-Rhéis</i>	28
<i>Fig. 10: Situation géographique du bassin versant de Guir</i>	29
<i>Fig. 11: Réseau hydrographique des différents bassins versants étudiés</i>	33
<i>Fig. 12: Carte géologique du bassin versant de la Moulouya</i>	36
<i>Fig. 13: Carte géologique des bassins côtiers méditerranéens</i>	37
<i>Fig. 14: Carte géologique du bassin versant de Tensift</i>	38
<i>Fig. 15: Carte géologique des bassins versants de Ziz-Rhéis</i>	40
<i>Fig. 16: Carte géologique du bassin versant de Guir</i>	40
<i>Fig. 17: Résultats de l'analyse en composantes principales</i>	52
<i>Fig. 18: Résultats de l'analyse factorielle discriminante</i>	54
<i>Fig. 19: Relation entre débit - pluie</i>	56
<i>Fig. 20: Précipitations moyennes mensuelles interannuelles</i>	58
<i>Fig. 21: Précipitations moyennes annuelles</i>	60
<i>Fig. 22: Débits moyens mensuels interannuels</i>	62
<i>Fig. 23: Débits moyens annuels</i>	63
<i>Fig. 24: Résultats des ajustements statistiques</i>	67
<i>Fig. 25: Corrélogramme simple (Mangin A., 1984)</i>	69
<i>Fig. 26: Spectre de densité de variance (Mangin A., 1984)</i>	71
<i>Fig. 27: Fonction d'amplitude</i>	74
<i>Fig. 28: Fonction de phase</i>	74
<i>Fig. 29: Fonction de cohérence</i>	75
<i>Fig. 30: Fonction de gain</i>	76
<i>Fig. 31: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 125 jours)</i>	77
<i>Fig. 32: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 1250 jours)</i>	77
<i>Fig. 33: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 125 jours)</i>	78

Fig. 34: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 1250 jours).....	78
Fig. 35: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station d'Ansegmir du 01/09/1973 au 31/08/1994.....	78
Fig. 36: Fonction de cohérence de la station d'Ansegmir pour la période de 1973 à 1994.....	79
Fig. 37: Fonction de gain de la station d'Ansegmir pour la période de 1973 à 1994.....	79
Fig. 38: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996 (m = 125 jours).....	80
Fig. 39: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996 (m = 1250 jours).....	80
Fig. 40: Analyse de la chronique des débits à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996 (m = 125 jours).....	81
Fig. 41: Analyse de la chronique des débits à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996 (m = 1250 jours).....	81
Fig. 42: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station d'Aghbalou du 01/09/1975 au 31/08/1996.....	81
Fig. 43: Fonction de cohérence de la station d'Aghbalou pour la période de 1975 à 1996.....	82
Fig. 44: Fonction de gain de la station d'Aghbalou pour la période de 1975 à 1996.....	82
Fig. 45: Analyse de la chronique des pluies à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994 (m = 125 jours).....	83
Fig. 46: Analyse de la chronique des pluies à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994 (m = 1250 jours).....	83
Fig. 47: Analyse de la chronique des débits à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994 (m = 125 jours).....	84
Fig. 48: Analyse de la chronique des débits à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994 (m = 1250 jours).....	84
Fig. 49: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994.....	84
Fig. 50: Fonction de cohérence à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994.....	85
Fig. 51: Fonction de gain à la station de Foum Tillicht du 01/09/1975 au 31/08/1994.....	85
Fig. 52: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 125 jours).....	86
Fig. 53: Analyse de la chronique des pluies à la station d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 1250 jours).....	86
Fig. 54: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 125 jours).....	87
Fig. 55: Analyse de la chronique des débits à la station d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994 (m = 1250 jours).....	87
Fig. 56: Corrélogramme croisé pluie-débit à la station d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994.....	87
Fig. 57: Fonction de cohérence à la station d'Ait Bouijjane du 01/09/1973 au 31/08/1994.....	88

Fig. 58: Fonction de gain à la station de d'Ait Bouijane du 01/09/1973 au 31/08/1994.....	88
Fig. 59: Schéma simplifié du mode de fonctionnement du modèle MERO.....	97
Fig. 60: Comparaison des hydrogrammes des débits simulés et observés (1972-1973).....	98
Fig. 61: Schéma d'un neurone artificiel.....	99
Fig. 62: Schéma d'un neurone biologique.....	100
Fig. 63: Architecture du modèle RNA à trois couches utilisée dans cette étude.....	103
Fig. 64: Architecture du modèle RNA à trois couches.....	106
Fig. 65: Sélection des variables d'entrée par ASE. A : Nombre d'années, B : Nombre de jours.....	107
Fig. 66: Architecture du modèle RNA	108
Fig. 67: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle pour les phases d'apprentissage et de test	109
Fig. 68: Evaluation de ASE en fonction du nombre de neurones dans la couche cachée.....	110
Fig. 69: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle pour les phases d'apprentissage, de test et de validation.....	112
Fig. 70: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle de Régression Multiple Linéaire (RLM).....	113
Fig. 71: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle de Régression Multiple Linéaire (RLM).....	114
Fig. 72: Coefficient de détermination en fonction du temps de prévision.....	116
Fig. 73: Comparaison entre les débits simulés et observés à t+2, t+3 et t+4 pour la phase de validation.....	117
Fig. 74: Comparaison entre les débits observés et les débits simulés par le modèle pour les phases d'apprentissage, de test et de validation.....	119

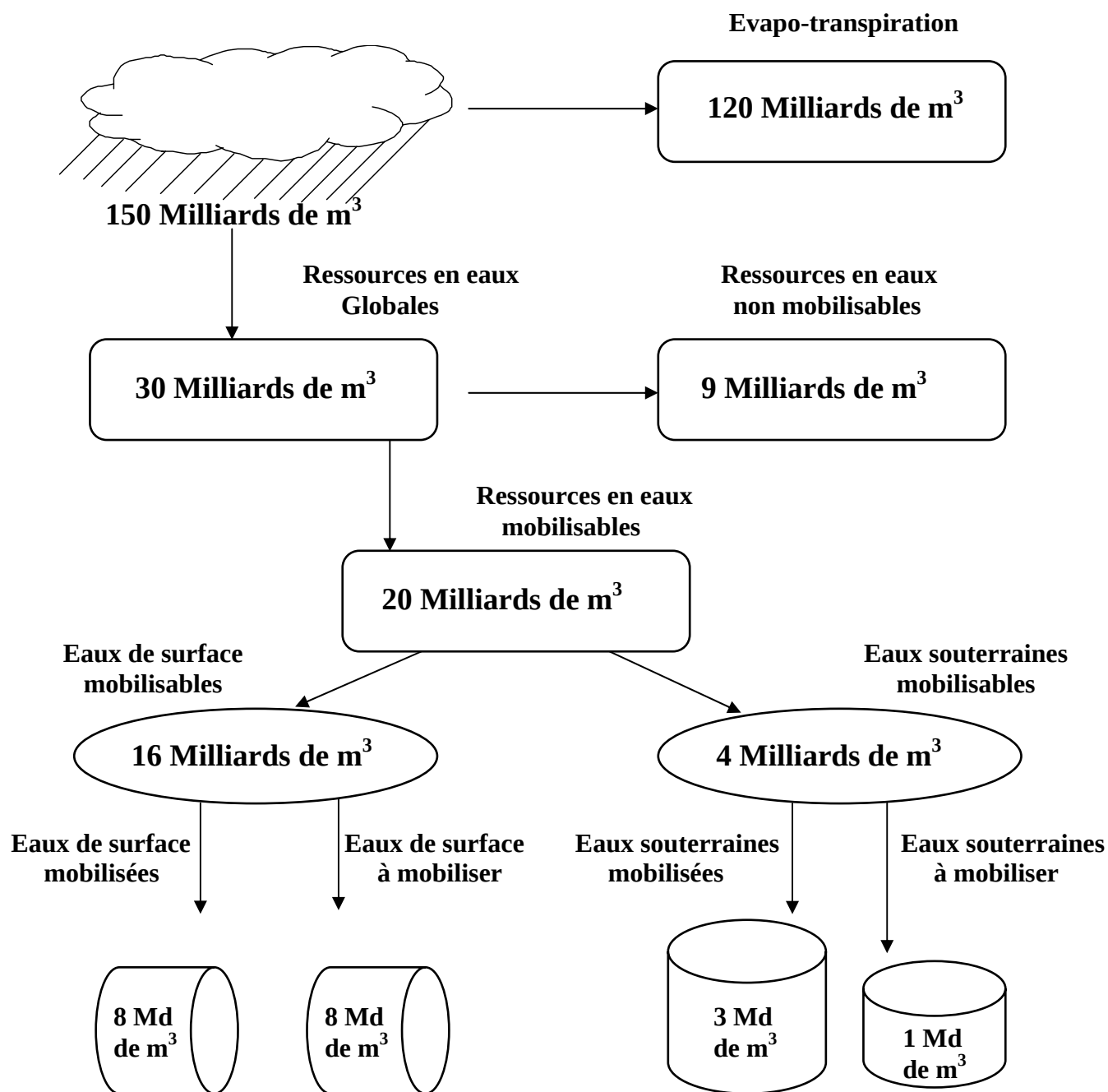
LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1: Répartition des précipitations moyennes par bassin.....	16
Tab. 2: Disponibilité des ressources en eau, projection sur 2020.....	19
Tab. 3: Différentes variables physiographiques des bassins versants étudiés.....	34
Tab. 4: Répartition géologique des différentes formations lithologiques en % des bassins versants étudiés.....	41
Tab. 5: Liste des différentes stations hydrométriques avec leurs principales caractéristiques.....	47
Tab. 6: Liste des différentes stations pluviométriques avec leurs principales caractéristiques.....	48
Tab. 7: Valeurs propres, pourcentage et cumul.....	50
Tab. 8: Matrice de corrélations entre les variables.....	51
Tab. 9: Corrélations entre les variables et les axes principaux.....	51
Tab. 10: Paramètres statistiques des pluies moyennes interannuelles.....	59
Tab. 11: Paramètres statistiques des débits moyens interannuels.....	64
Tab. 12: Estimation du Quantile de crue de l'oued Ansegmir.....	65
Tab. 13: Estimation du Quantile de crue de l'oued Ourika.....	66
Tab. 14: Estimation du Quantile de crue de l'oued Sidi Hamza.....	66
Tab. 15: Estimation du Quantile de crue de l'oued Todrha.....	66
Tab. 16: Résumé des résultats de l'ACS des bassins versants analysés.....	89
Tab. 17: Paramètres retenus de la simulation du modèle MERO pour le bassin étudié.....	98
Tab. 18: Analogie entre les neurones biologiques et artificiels.....	100
Tab. 19: Paramètres statistiques du modèle de réseau de neurones du bassin d'Ourika.....	110
Tab. 20: Paramètres statistiques du modèle de réseau de neurones du bassin d'Ourika.....	111
Tab. 21: Comparaison des coefficients de corrélation obtenus pour les modèles de RNA et RLM.....	115
Tab. 22: Comparaison des critères de convergence pour différentes périodes de prévision.....	115
Tab. 23: Paramètres statistiques du modèle de réseau de neurones du bassin d'Ansegmir.....	118

ANNEXES

Annexe I
Répartition des ressources en eau



Potentiel et état d'utilisation des ressources en eau au Maroc

Annexe II

Analyse fréquentielle des crues

Méthodes d'ajustement

Elles consistent à déterminer les paramètres d'une loi (dont la formulation a déjà été choisie) en fonction de l'échantillon observé.

➤ La méthode des Moments :

La méthode des moments consiste à estimer d'après l'échantillon autant de moments que la loi a des paramètres et à égaler ces estimations aux valeurs théoriques qui ne sont fonctions que des paramètres à estimer. On obtient alors un système de n équations à n inconnues. Les estimations ainsi obtenues sont généralement consistantes mais non efficaces.

La méthode des moments associe l'équation générale du calcul du $n^{\text{ième}}$ moment à partir de l'origine de la distribution aux paramètres de la distribution analysée :

$$\Gamma'_n = \int_{-\infty}^{+\infty} X^n \cdot \rho(x) \cdot d_x$$

Avec n : l'ordre ; $\rho(x)$: fonction de densité de probabilité.

On considère autant de moments indépendants que l'on doit estimer de paramètres. On utilise en général les moments d'ordre le plus faible possible.

Loi à 2 paramètres : on considère la moyenne et la variance

Loi à 3 paramètres

➤ La méthode du Maximum de vraisemblance : (probabilité maximum)

Dans le cas d'une loi discontinue où on a observé un échantillon $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, chaque valeur ayant une probabilité $(P_1, P_2, \dots, P_n)$, la probabilité P de voir apparaître cet échantillon est :

$$P = P_1 * P_2 * P_n$$

Dans le cas de lois continues, $P_1, P_2, \dots, P_n$ sont infiniment petits. On admet alors que la vraisemblance de l'échantillon est proportionnelle au produit des densités de probabilité :

$$P = K f(x_1) f(x_2) \dots f(x_n)$$

$$L = \frac{P}{K} \quad L = f(x_1, a, b, \dots, k) f(x_2, a, b, \dots, k) f(x_n, a, b, \dots, k)$$

$a, b, \dots, k$ sont les k paramètres de la loi.

On se propose de choisir ces paramètres de façon à ce que la vraisemblance de l'échantillon soit maximale. Pour cela, la dérivée partielle de L par rapport aux k paramètres successifs est nulle :

$$\frac{\partial L}{\partial l} = 0 \text{ avec } l = a, b, \dots, k.$$

On obtient ainsi un système de k équations à k inconnues.

Il est bien souvent plus simple d'effectuer les transformations suivantes :

$$\text{Log } L = \sum_1^n \log f(x); \Rightarrow \begin{cases} \sum_1^n \frac{1}{f(x)} \frac{\partial f(x)}{\partial a} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \sum_1^n \frac{1}{f(x)} \frac{\partial f(x)}{\partial k} = 0 \end{cases}$$

La méthode du maximum de vraisemblance donne des estimations correctes et efficaces et souvent absolument correctes.

Cependant, on se gardera d'utiliser cette méthode dans le cas où l'intervalle de variation correspond à des bornes finies pour lesquelles la densité de probabilité n'est pas nulle (dans ce cas, on peut rencontrer non pas un maximum mais un minimum de probabilités).

Définition de la période de retour

La probabilité est le rapport du nombre d'événements favorable au nombre total d'événement. Souvent à un événement est associé une durée (il y a une crue maximale annuelle chaque année). La fréquence peut alors se définir également comme étant le nombre d'événements favorable sur le nombre total de durées. On définit alors la période de retour T (ou temps de récurrence) comme l'inverse de la fréquence au dépassement ou au non-dépassement.

Les fréquences ont pour unité (T^{-1}) , puisque l'on associe généralement une durée à chaque événement. La période de retour a donc la dimension d'un temps.

La période de retour est définie par les relations suivantes :

$$T = \frac{1}{1-q} = \frac{1}{p} \quad (\text{Crue})$$

$$T = \frac{1}{q} = \frac{1}{1-p} \quad (\text{Étiage})$$

$$q = F(x) : \text{Probabilité au non-dépassement}$$

$$p = 1 - F(x) : \text{Probabilité au dépassement}$$

Pour tracer les points représentatifs de l'échantillon, on doit leur affecter une probabilité au non-dépassement, appelée probabilité empirique.

Formule de probabilité empirique

$$F [x(k)] = \frac{(k-a)}{(n-2a+1)}, \quad 0 \leq a \leq 0,5$$

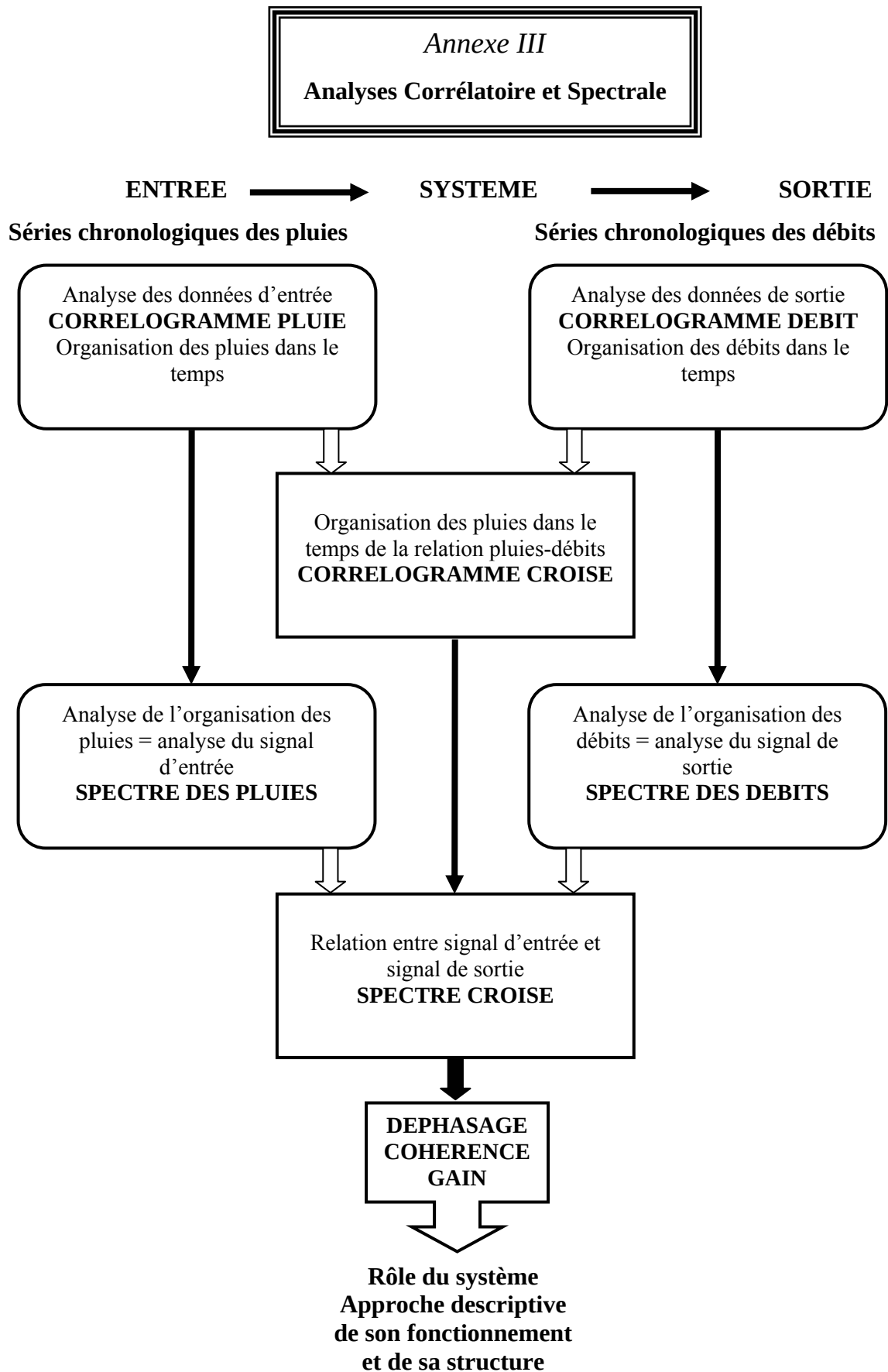
$a = 0,40$ (Formule de Cunnane) qui est utilisée par défaut dans HYFRAN

$a = 0,44$ (Formule de Gringorten)

$a = 0,50$ (Formule de Hazen)

BASSIN VERSANT	STATION	N°IRE (Code)	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation	N
Ziz-Rhéris et Guir	Foum Tillicht	1508/38	7	654	243	178	0.733	22
	Tadiguouste	426/47	4.7	3130	365.4	648.1	1.774	34
	Meroutcha	1548/56	6.28	890	405	347	0.857	11
	Ait bouijjane	355/55	0.912	508	147	159	1.08	21
	Tazouguert	628/48	0.04	930	356	290	0.814	36
	Tit Naissa	330/39	15.4	686	213	217	1.02	20
La Moulouya	Ansegmir	658/38	11.6	394	101	94	0.928	38
	Tabouazant	732/38	1.95	50	23.6	19.7	0.851	32
	Zaida	318/30	10.4	225	84.2	62.5	0.743	38
	Laarichate	75/31	0.529	218	100	65.59	0.655	11
	El Aouia	806/30	0.065	157	39.42	46.88	1.189	20
	Ksibate	440/23	0.362	230	66.15	75.46	1.141	22
	Bel Farah	261/16	27.5	1000	254	232	0.913	35
	Guercif	184/17	7.9	1360	320	314	0.981	43
	Pont de Zakka	302/17	35.1	262	145	84.3	0.581	14
	El Ghoress	226/17	1.91	540	69.1	124	1.79	26
	Berkane	1433/12	0.0283	206	27.9	52.73	1.94	23
Tensift	Aghbalou	2089/53	8.10	1060	227	292	1.28	31
	Taferiat	1562/53	14.7	680	134	146	1.08	30
	Tahanaout	1565/53	8.70	762	89.6	176	1.96	30
	Iguir NKouris	510/62	13.7	1120	182	235	1.29	30
	Imin El Hamam	1566/53	9	1220	285	312	1.10	31
	Sidi Rahal	44/54	5.50	636	194	145	0.751	30
Bassins Côtiers Médi- terraneés	Tighza	385/10	0.290	201	52.5	57.2	1.09	18
	Takenfoust	386/10	0.210	84.3	23.2	29.4	1.27	9
	Tleta Azlef	114/10	5.29	328	106	95	0.892	28
	Ajdir	384/10	0.065	16.20	3.413	5.144	1.507	19
	Tamallaht	269/5	1.59	247	48.2	55.3	1.147	31

Paramètres statistiques des débits maximums instantanés des bassins versants analysés

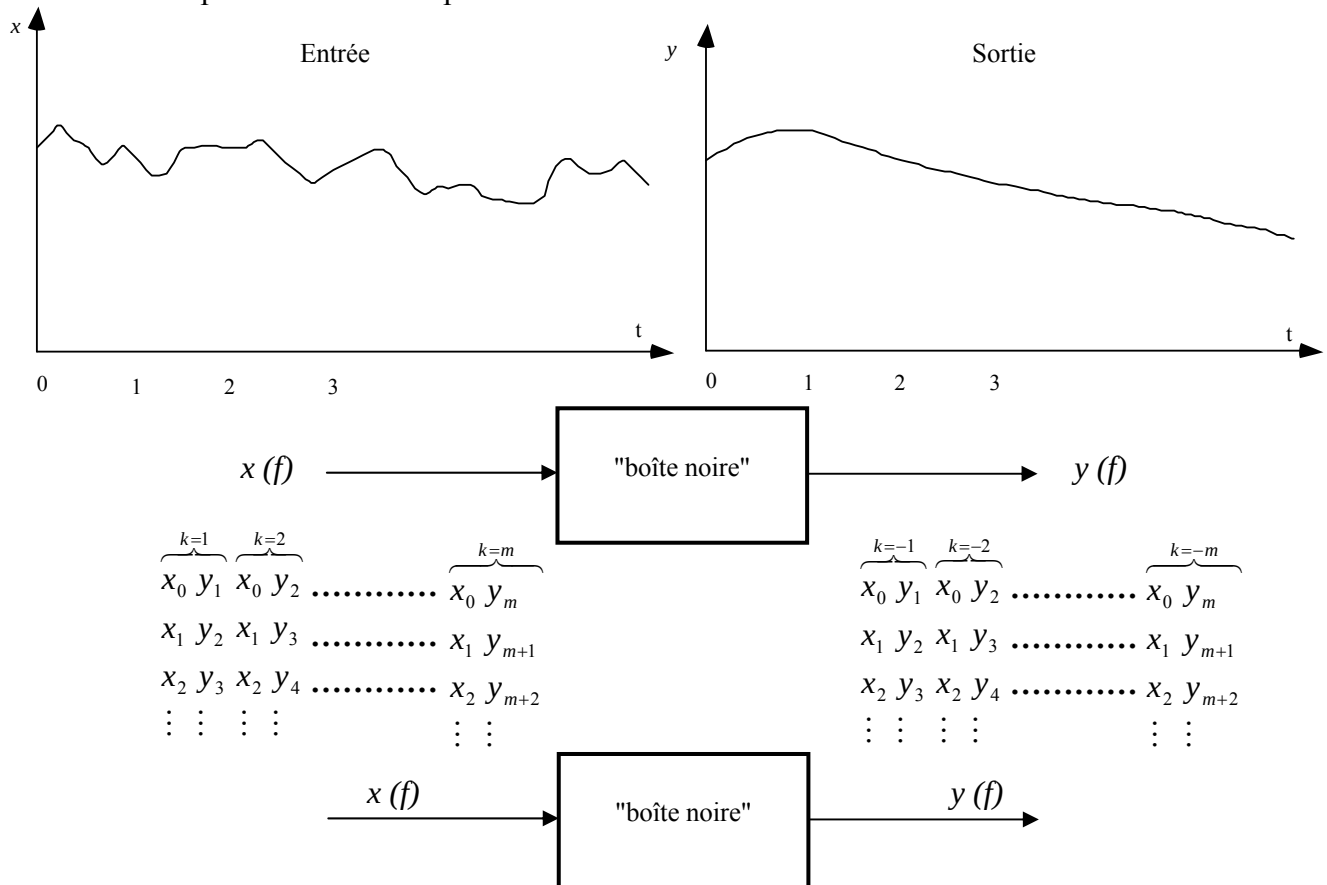


Organigramme des Analyses Corrélatoire et Spectrale (ACS)

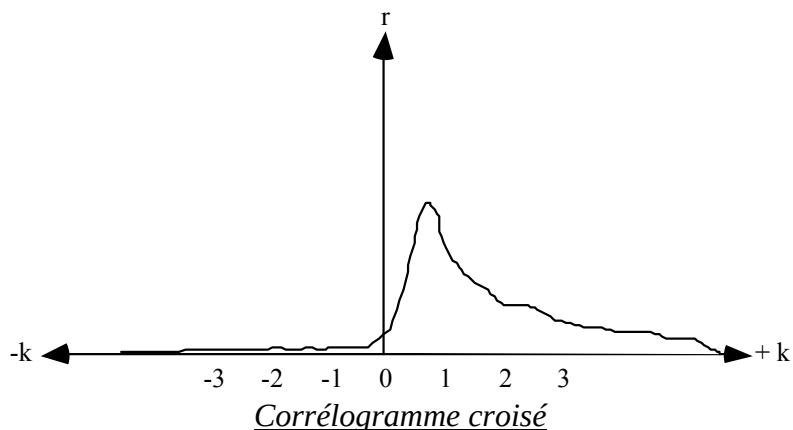
Analyse dans le domaine fréquentiel

Corrélogramme croisé

- ❖ Si l'entrée est aléatoire, alors le corrélogramme fourni une bonne image de la réponse impulsionnelle du système.
- ❖ Si le signal d'entrée est structuré, alors le corrélogramme croisé fera apparaître les périodicités,
- ❖ Si le corrélogramme croisé est symétrique, alors les processus choisis comme étant les entrées et les sorties peuvent être reliés par une même cause.



Si la fonction d'entrée est une fonction aléatoire pure, le corrélogramme croisé correspond à une réponse impulsionnelle.



Spectre : $S_x(f) = \text{var. } x$

Spectre : $S_y(f) = \text{var. } y$

Fonction d'amplitude croisée : $S_{xy}(f) = \text{cov ar. } xy$

$$C_{xy}(f) = \frac{\text{cov ar } xy}{\sqrt{\text{var } x \cdot \text{var } y}} = \text{corrélation entre } x \text{ et } y = \underline{\text{fonction de cohérence}}$$

$$g_{xy}(f) = \sqrt{\frac{\text{var } y}{\text{var } x}} \text{ corr } xy = \text{régression entre } x \text{ et } y = \underline{\text{fonction de gain.}}$$

Filtres (D_k)

La transformée de Fourier s'applique :

- ❖ à une fonction continue
- ❖ évoluant jusqu'à l'infini

D'où la nécessité :

- ❖ d'un lissage en raison de la discrétisation,
- ❖ de rendre nulles les valeurs au delà de la troncature m

Deux possibilités :

- ❖ préfiltrage de r_k correspondant à D_k
- ❖ postfiltrage du spectre obtenu

Solution retenue, préfiltrage D_k à partir de différents filtres :

✓ Bartlett $D_k = 1 - k/m$,

✓ Parzen (1) $D_k = 1 - k^2/m^2$,

(2) $D_k = 1 - 6k^2/m^2 (1 - k/m)$ pour $0 \leq k \leq m/2$,

$D_k = 2(1 - k/m)^3$ pour $m/2 \leq k \leq m$,

✓ Tukey (1) $D_k = 1 - 0,46 + 0,46 \cos\left(\pi k/m\right)$,

(2) $D_k = \left(1 + \cos \pi k/m\right) / 2$.

