

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE



Projet de fin d'étude
Présenté par
Sonia Sekoura AÏT-MESBAH

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat
En HYDRAULIQUE

Thème

**Optimisation de la gestion du barrage de la
Cheffia par la méthode des Algorithmes
Génétiques.**

Devant le jury :

Président : Pr. N.DECHEMI
Encadreur : Dr. A. BERMAD
Examineur : Mr. N. MEZZENER
Examineur : Dr. A. LEFKIR
Invité : Mr. M. HOUGLAOUENE

Promotion Juin 2011

Pour leur soutien et leur présence, à:

Ma douce, très chère et tendre mère,

Mon cher père,

Mon adorable sœur,

Ma grand-mère; mes tantes; mes oncles; ma grande famille,

Mes amis,

Mehdi.

Remerciements

Arrivée au terme de la rédaction de ce mémoire, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements à tous ceux qui, par leur enseignement, leur soutien et leurs conseils, m'ont aidé à sa réalisation.

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma gratitude au professeur N. Dechemi pour sa patience, son enthousiasme, son optimisme, son esprit scientifique et rigoureux, et ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier mon encadreur, le Docteur. A. Bernad, pour avoir accepté de me diriger, avec patience, dévouement et grand intérêt, et sans qui ce mémoire n'aurait pas pu voir le jour.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers Mme Z. Chekired, pour son travail au quotidien, sa collaboration très étroite, et son support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Mes remerciements sont adressés aussi à Mr. M. Zaabot et Mr. S. Heddam, dont les connaissances sur les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones respectivement m'ont été d'une très grande aide.

J'adresse aussi mes remerciements les plus sincères à ma chère tante, Docteur O. Belkacem qui m'a transmis l'amour de la recherche.

Enfin, au terme de ces remerciements, je souhaiterais rendre hommage aux membres de ma famille, et en particulier à mes parents pour leur soutien incommensurable et leurs sacrifices tout au long de mes années d'études.

قد يدور هذا البحث أسسا على تحقيق المستوى الأمثل من إدارة سد "الشفيا" ، و ذلك مستنديين على الخوارزميات الوراثية. و لهذا، تم اختيار هدفين: الأول يتمثل في تلبية طلب مختلف المستخدمين في شتى القطاعات بإعطاء الأولوية لكل من AEP, AEI و الري. و ثاني هدف يكمن في ضمان وجود حد أدنى من المياه في السد يقدر ب30 م³ و كون تنفيذ هذا النمط من التسيير محقق في مستقبل غامض، قمنا بتطوير نموذج "ماكروفييني" متعدد الأقسام الذي سمح لنا من محاكاة سيناريو للتدفق المستقبلي. فتم تحقيق نموذج قائم على الخوارزميات الوراثية بهدف تحديد حاصل المنحة الشهرية الأمثل الخاص بالقطاعات الثلاث. حيث ارتباط هذا الأخير بالشبكات العصبية يسمح توزيع أفضل للمورد عبر مختلف القطاعات.

الكلمات الرئيسية

سد, إدارة, الخوارزميات الوراثية

This work of research is « directed » on the optimisation of the management of the Cheffia's dam with genetic « algorithms ».

Two aims were selected : The first consists on the satisfaction of the demand of different users' sectors by giving priorities respectively to the AEP, AEI and irrigation ; the second is to assure a minimum stock of 30M³ in the dam.

The management being realised in an uncertain future, we have developped a multiclass, Markovic model that allowed us to simulate a script of future flows.

A model based on the genetic « algorithms » has been elaborated in order to determine the total optimal monthly endowment of the three sectors at once. This model, coupled with the network of neurons, allows the best endowment of the resource to the different sectors.

Key words :

Genetic Algorithm, managemDams.

Ce travail de recherche est axé sur l'optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par les algorithmes génétiques.

Deux objectifs ont été choisis : Le premier consiste à satisfaire la demande des secteurs des différents usagers en donnant les priorités respectivement à l'AEP, l'AEI, et l'irrigation et le second à garantir un stock minimum de 30M³ dans le barrage.

La gestion étant réalisée dans un avenir incertain, nous avons développé un modèle Markovien multi classe qui nous a permis de simuler un scenario de débits futurs.

Un modèle basé sur les algorithmes génétiques a été élaboré pour déterminer la dotation mensuelle optimale totale des trois secteurs confondus. Celui-ci, couplé aux réseaux de neurones permet la meilleure allocation de la ressource aux différents secteurs.

Mots clés :

Algorithmes génétiques, gestion, barrages.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n° II-1 : Caractéristiques de la digue du barrage de la Cheffi	21
Tableau n° II-2 : Caractéristiques des ouvrages de prise du barrage de la Cheffia	22
Tableau n° II-3 : Représentation des valeurs des crues.....	26
Tableau II-4 : Evapotranspiration en mm par mois	27
Tableau II-5 : Résumé des caractéristiques du barrage de la Cheffi	27
Tableau n° II-6 : Répartition des superficies nettes irrigables du périmètre de la Bounamoussa.....	29
Tableau n° II-7 : Caractéristiques des stations du sous-bassin de la Cheffia.....	30
Tableau n° II.8 : Données du barrage de la Cheffia.....	31
Tableau n° II-9 : Résultats du Test de Grubbs et Beck.....	33
Tableau n° II-10 : Résultats du Wilcoxon-Mann-Withney.....	34
Tableau n° II-11 : Résultats du test de Wald-Wolfowitz.....	36
Tableau n° III-1 : Caractéristiques de l'analyse des apports par groupement de variables.....	39
Tableau n° III-2 : Caractéristiques de l'analyse des dotations pour l'AEP par groupement de variables.....	47
Tableau n° III-3 : Pénalités des allocations annuelles pour chaque secteur.....	47
Tableau n° III-4 : Pénalités des allocations annuelles des trois secteurs confondus.....	47
Tableau n° III-5 : Pénalités des allocations annuelles totales, pour la gestion réelle.....	48
Tableau n° III-6 : Pénalités des allocations annuelles de chaque secteur, pour la gestion réelle.....	51
Tableau n° III-7 : Demande maximale des trois secteurs (AEP, AEI et Irrigation).....	51
Tableau n° III-8 : Demande minimale des trois secteurs (AEP, AEI et Irrigation).....	52
Tableau n° III-9 : Comparaison des pénalités annuelles globales des gestions réelle et manuelle.....	55

Tableau n° III-10 : Comparaison des pénalités annuelles pour chaque secteur des gestions réelle et manuelle.....	55
Tableau n° IV-1 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 11.....	73
Tableau n° IV-2 : Mois de défaillance lors de la gestion11.....	73
Tableau n° IV-3 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 12.....	74
Tableau n° IV-4 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 21.....	74
Tableau n° IV-5 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 22.....	75
Tableau n° IV-6 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 3.....	75
Tableau n° IV-7 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 4.....	75
Tableau n° IV-8 : Résultats des taux de satisfactions des gestions entre 2000 et 2010.....	76
Tableau n° IV-9 : Probabilités des dotations annuelles des trois secteurs confondus pour l'historique.....	79
Tableau n° IV-10 : Probabilités des dotations annuelles de chaque secteur pour l'historique.....	79
Tableau n° IV-11 : Comparaison des probabilités des dotations annuelles de chaque secteur pour les trois gestions.....	79
Tableau n° V-1: Coefficient de pondération des pluies des stations pluviométrique considérée.....	94
Tableau n° V-2 : Paramètres du modèle GR2M appliqué sur les pluies pondérées.....	94
Tableau n° V-3 : Critères numériques de validation du modèle GR2M utilisant la pluie.....	96
Tableau n° V-4 : Coefficients de déterminations et de corrélations entre débits et pluies observés de chaque station.....	99
Tableau n° V-5 : Paramètres du modèle GR2M appliqué sur les pluies du pluviomètre du barrage.....	99
Tableau n° V-6 : Critères numériques de validation du modèle GR2M utilisant les pluies du pluviomètre du barrage.....	101
Tableau n° V-7 : Matrice contenant les bornes des classes de chaque saison.....	102
Tableau n° V-8 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 1.....	103
Tableau n° V-9: Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 2.....	103
Tableau n° V-10 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 3.....	103

Tableau n° V-11 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 4.....	103
Tableau n° V-12 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 5.....	104
Tableau n° V-13 : Critères de validation du scénario obtenu par les chaînes de Markov.....	104
Tableau n° V-14 : Pénalités des dotations annuelles des trois secteurs confondus pour le scénario futur.....	109
Tableau n° V-15 : Pénalités des dotations annuelles de chaque secteur pour le scénario futur.....	109
Tableau n° V-16 : Poids de la couche d'entrée vers la couche cachée.....	112
Tableau n° V-17 : Biais de la couche cachée.....	112
Tableau n° V-18 : Poids de la couche cachée vers la couche de sortie.....	112
Tableau n° V-19 : Biais de la couche de sortie.....	112
Tableau n° V-20 : Calcul des valeurs des neurones de sorties.....	113
Tableau n° V-21 : Coefficients de détermination pour les trois secteurs en période de calage et de validation issues du modèle des réseaux de neurones.....	113
Tableau n° V-22 : Comparaison des pénalités annuelles des trois secteurs pour les gestions manuelles et par Réseaux de Neurones.....	115
Tableau n° V-23 : Moyennes des taux de satisfactions annuels des trois secteurs pour les gestions manuelles et par RN.....	118

LISTE DES FIGURES

Figure n° II-1 : Présentation de la zone d'étude.....	23
Figure n° II- 2 : Moyennes mensuelles inter annuelles des apports au barrage en Mm ³	25
Figure n° II-3 : Moyennes mensuelles inter annuelles des pluies en mm.....	26
Figure n° III-1 : Représentation des apports annuels historiques.....	38
Figure N° III-2 : Analyse des vidanges annuelles historiques.....	40
Figure n° III-3 : Représentation des allocations annuelles historiques pour l'AEP.....	41
Figure n° III-4 : Représentation des allocations annuelles historiques pour l'irrigation.....	42
Figure n° III-5 : Représentation des allocations annuelles historiques pour l'AEI.....	43
Figure n° III-6 : Représentation des allocations annuelles historique des trois secteurs.....	43
Figure n° III-7 : Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'AEP.....	44
Figure n° III-8 : Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'AEI.....	44
Figure n° III-9 : Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'Irrigation....	45
Figure n° III-10 : Cercle de corrélation CP1' et CP2' des 14 paramètres de la gestion passée.....	46
Figure n° III-11 : Variation du taux de satisfaction annuel total de la gestion réelle.....	49
Figure n° III-12 : Surfaces en fonction des volumes.....	52
Figure n° III-13 : Les cotes en fonction des volumes.....	53
Figure N° III-14 : Comparaison des taux de satisfactions annuels des gestions manuelle et réelle....	56
Figure N° III-15 : Cercle de corrélation CP1'-CP2' de la gestion manuelle.....	56
Figure n° IV-1 : Modèle de la roulette.....	62
Figure n° IV-2 : Croisement à un point.....	64
Figure n° IV-3 : Croisement à deux points.....	65
Figure n° IV-4 : Croisement à masque.....	65
Figure n° IV-5 : Mutation.....	66
Figure n° IV-6 : Boucle générationnelle.....	66
Figure n° IV-7 : Taux de satisfaction des gestions entre 2000 et 2010.....	76
Figure n° IV-8 : Taux de satisfaction annuel de la gestion de l'historique par AG pour les trois secteurs confondus.....	77

Figure n° IV-9 : Taux de satisfaction annuel global des trois gestions (Réelle, rationnelle et par AG)	78
Figure n° IV-10 : Cercle de corrélation de la CP1' et CP2' pour la gestion par AG.....	80
Figure n° V-1 : Représentation de l'évolution des paramètres hydrologiques dans le temps.....	81
Figure V-2 : Ajustement des apports mensuels du mois de Septembre à la loi Normale.....	87
Figure V-3 : Ajustement des apports mensuels du mois de Septembre à la loi de Gumbel.....	87
Figure n° V-4 : Représentation des étapes du modèle (Source : Moulehi et al. (2006))	88
Figure n° V-5 : Représentation des zones d'influence des stations pluviométriques.....	94
Figure n° V-6 : Calage des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M.....	95
Figure n° V-7 : Validation des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M.....	95
Figure n° V-8 : Corrélations entre débits observés et débits simulés issus du modèle GR2M utilisant la pluie pondérée.....	96
Figure n° V-9 : Corrélation des pluies de la station d'Ain Kerma aux apports historiques.....	97
Figure n° V-10 : Corrélation des pluies du pluviomètre barrage aux apports historique.....	97
Figure n° V-11 : Corrélation des pluies de la station de Bouhadjar aux apports historiques	97
Figure n° V-12 : Corrélation des pluies de la station de Mechrouha aux apports historiques	98
Figure n° V-13 : Corrélation de la moyenne pondérée des pluies aux apports historiques	98
Figure n° V-14 : Corrélation de la moyenne arithmétique des pluies aux apports historiques.....	98
Figure n° V-15 : Calage des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.....	100
Figure n° V-16 : Validation des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.....	100
Figure n° V-17 : Corrélation entre débits historiques et simulés par le modèle GR2M appliqué au pluviomètre du barrage.....	101
Figure n° V-18 : Cercle de corrélation de la CP1' à la CP2' pour les débits mensuels.....	102
Figure V-19 : Comparaison des moyennes mensuelles interannuelles du scénario simulé.....	105
Figure V-20 : Validation des écarts types mensuels interannuels du scénario des pluies simulées.....	105
Figure n° V-21 : Représentation dans le temps des pluies historiques et simulées par le modèle markovien multi-classes (pluviomètre barrage).....	106

Figure n° V.22 : Représentation dans le temps des débits historiques et simulés par le modèle GR2M.....	106
Figure n° V.23 : Représentation des apports moyens annuels du scénario.....	107
Figure n° V-24 : Taux de satisfaction annuel du scénario simulé pour les trois secteurs confondus	108
Figure n° V-25 : Schéma simplifié du neurone.....	110
Figure n° V-26 : Corrélation entre dotations manuelles pour l'AEP, et dotations simulées par les Réseaux de Neurones.....	114
Figure n° V-27 : Corrélation entre dotations manuelles pour l'Irrigation, et dotations simulées par les Réseaux de neurones.....	114
Figure n° V-28 : Corrélation entre dotations manuelles pour l'AEI, et dotations simulées par les Réseaux de Neurones.....	114
Figure n° V-29 : Comparaison des allocations de l'AEP par les modèles de gestion manuelle et par les réseaux de neurones.....	116
Figure n° V-30 : Comparaison des allocations de l'Irrigation par les modèles de gestion manuelle et par les réseaux de neurones.....	116
Figure n° V-31 : Comparaison des allocations de l'AEI par les modèles de gestion manuelle et par les Réseaux de neurones.....	117
Figure n° V-32 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de gestion manuelle.....	117
Figure n° V-33 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de gestion par les Réseaux de Neurones.....	118

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE,.....	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : THEORIE ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction.....	3
I.2. Gestion des barrages réservoirs	3
I.2.1. Les objectifs des réservoirs	3
I.2.1.1. Régulation des débits d'apports	3
I.2.1.2. Desserte en eau d'irrigation	4
I.2.1.3. Alimentation en eau potable	4
I.2.1.4. Production d'énergie électrique	4
I.2.1.5. Maintien d'un niveau écologique minimum	4
I.2.1.6. Navigation	4
I.2.1.7. Plaisance	4
I.3. Gestion du risque.....	5
I.3.1. Les incertitudes stratégiques	5
I.3.2. Les incertitudes physiques	5
I.3.3. Les incertitudes technologiques	5
I.4. Prévision des apports.....	6
I.5. Evaluation de la performance d'une gestion.....	6
I.6. Optimisation de la gestion d'un barrage.....	10
I.6.1. Notion d'optimisation	10
I.6.2. Formulation mathématique	11
I.6.3. Méthodes d'optimisation	12
I.6.4. Optimisation analytique.....	12
I.6.5. Programmation linéaire (Linear programming LP).....	13
I.6.6. Programmation non linéaire (non-linear programming - NLP).....	14
I.6.7. Programmation dynamique (dynamic programming).....	15
I.6.8. Réseaux de neurones artificiels.....	15
I.6.9. Logique Floue	16
I.6.10. Métaheuristique	17
I.6.11. Domaines d'utilisation des Algorithmes génétiques	18

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Généralités.....	22
II.2. Historique des travaux	23
II.3. Les ouvrages.....	23
II.3.1. Digue	23
II.3.2. Evacuateur principal	24
II.3.3. Vidange de fond.....	24
II.3.4. Ouvrages de prise	24
II.4. Caractéristiques du bassin versant	24
II.4.1. Aperçu sur le Bassin de Mefragh	24
II.4.2. Relief du bassin versant.....	26
II.4.3. Géologie du Bassin Versant.....	26
II.4.4. Couverture végétale.....	26
II.4.5. Neige.....	26

II.5. Régime des apports de la Bou-Namoussa au barrage de la Cheffia.....	26
II.5.1. Description de l'Oued.....	26
II.5.2. Régimes de l'Oued.....	27
II.5.3. Fréquence des crues.....	27
II.6. Hydrologie du site.....	28
II.6.1. Pluies.....	28
II.6.2 Evaporation.....	28
II.6.3 Transport Solide.....	29
II.7. Alimentation en eau de la Ville d'Annaba.....	29
II.8. Industrie.....	30
II.9. Périmètre de la Bounamoussa.....	31
II.10. Données prises en compte dans l'étude.....	32
II.11. Problèmes de données.....	33
II.11.1. Comblement des lacunes.....	34
II.11.2. Détection des valeurs douteuses (Test de Grubbs et Beck).....	34
II.11.3. Critique des données.....	35
II.11.3.1. Test d'homogénéité (Wilcoxon-Mann-Withney).....	35
II.11.3.2 Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz).....	37

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA GESTION EXISTANTE DU BARRAGE

III.1. Introduction.....	39
III.2. Analyse des apports.....	39
III.3. Analyse des vidanges.....	41
III.4. Analyse des dotations annuelles.....	42
III.4.1. Dotation pour l'AEP.....	42
III.4.2. Dotation pour l'irrigation.....	43
III.4.3. Dotation pour l'industrie.....	44
III.4.4. Consommation totale.....	45
III.5. Analyse des dotations mensuelles.....	46
III.6. Analyse des données par la méthode de l'ACP.....	47
III.6.1 Application de l'ACP sur les paramètres du barrage.....	48
III.7. Critique de la gestion réelle ou historique.....	49
III.8. Gestion manuelle.....	51
III.8.1. Equation de continuité.....	51
III.8.1.1. Détermination des allocations des trois secteurs.....	52
III.8.1.1.1. Demande maximale.....	52
III.8.1.1.2. Demande minimale.....	53
III.8.1.2. Calcul du volume d'eau évaporé du barrage.....	54
III.8.1.3. Calcul des cotes d'eau dans le barrage.....	55
III.8.1.4. Calcul du volume d'eau vidangé.....	55
III.8.1.5. Calcul de la consommation totale.....	56
III.9. Analyse de la gestion manuelle.....	56
III.9.1. Comparaison de la simulation des gestions manuelles et réelles.....	56
III.10. Conclusion.....	59

CHAPITRE IV : OPTIMISATION DE LA GESTION HISTORIQUE PAR LES ALGORITHMES GENETIQUES

IV.1. Introduction.....	60
IV.2. Théorie des Algorithmes Génétiques.....	60
IV.2.1 Historique et analogie avec la biologie.....	60

IV.2.3. Principe général.....	62
IV.2.4. Création de la population initiale.....	62
IV.2.5. Opérateurs de sélection.....	62
IV.2.5.1. La sélection par la roue de la fortune (Roulette wheel selection)	63
IV.2.5.2. La sélection par tournoi	64
IV.2.5.3. La méthode élitiste	65
IV.2.6. Opérateurs de variation.....	65
IV.2.6.1. Les opérateurs de croisement.....	66
IV.2.6.2. Les opérateurs de mutation.....	67
IV.2.7. La boucle générationnelle.....	68
IV.2.8. Fonction de performance.....	68
IV.2.9. Pénalités.....	69
IV.2.10. Considérations sur la convergence des Algorithmes Génétiques (AG)	70
IV.3. Programmation des Algorithmes Génétiques.....	70
IV.3.1 Nature des individus	70
IV.3.2 Fonction objectif	71
IV.3.3 Détermination de la demande	71
IV.3.4 Détermination des volumes d'eau dans la réserve.....	72
IV.3.5. Pénalités et fitness fonction	72
IV.3.6 Sélection pour la reproduction.....	73
IV.3.6 Croisement.....	73
IV.3.7 Mutation.....	73
IV.3.8 Sélection pour le remplacement.....	74
IV.3.9 Taille de la population et nombre de générations.....	74
IV.4 Test de l'algorithme génétique entre 2000-2010.....	74
IV.5. Gestion des 40 années par AG.....	79
IV.6. Conclusion	82

CHAPITRE V : SIMULATION ET OPTIMISATION FUTURES

V.1. Introduction.....	83
V.2. Nécessité d'utilisation d'un modèle de simulation.....	83
V.3. Théorie sur la modélisation par les chaînes de Markov	84
V.3.1. Introduction.....	84
V.3.2. Les modèles binaires.....	85
V.3.2. 1. Les modèles d'ordre 0	85
V.3.2.2. Les modèles d'ordre 1	85
V.3.3. Les modèles multi classes.....	86
V.3.3.1. Modèles d'ordre 1	86
V.3.4. Phénomène saisonnier	87
V.3.5. Simulation par les modèles multi-classes	87
V.3.6. Comparaison entre série historique et simulée	88
V.4. Simulation des apports	88
V.4.1. Utilisation du modèle GR2M.....	90
V.4.1.1. Critère de validation du modèle.....	91
V.4.1.2. Paramètres du modèle.....	93
V.4.2. Simulation des pluies.....	93
V.4.2.1. Une pluie représentative du bassin versant.....	93
V.4.2.1.1. Méthode de la moyenne arithmétique	94
V.4.2.1.2. Méthode des polygones de Thiessen	94

V.4.2.1.3. Méthode des isohyètes	95
V.4.2.2 Application du modèle GR2M sur la pluie pondérée.....	96
V.4.2.3. Application du modèle GR2M sur la pluie du pluviomètre du barrage... ..	101
V.4.3. Simulation des pluies par les modèles markovien multi-classes.....	103
V.4.4. Simulation des débits par les modèles GR2M.....	108
V.5. Gestion future.....	110
V.6. Amélioration du modèle par les réseaux de neurones.....	112
V.6.1. Généralités sur les réseaux de neurones	112
V.6.1.1. Le neurone biologique	112
V.6.1.2. Le neurone formel (artificiel)	113
V.6.2 Elaboration du modèle des réseaux de neurones	113
V.6.3 Résultats du modèle des réseaux de neurones	115
V.7. Conclusion.....	121
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	122
BIBLIOGRAPHIE.....	124
ANNEXES.....	126

INTRODUCTION GENERALE

En Afrique, tout comme dans beaucoup de régions du monde, le développement de la gestion de la ressource en eau a été entravé par la pénurie de celle-ci. (O.C.O.D, 2000).

En Algérie, les ressources hydriques naturelles dépendent souvent de la pluviométrie qui est très inégalement répartie sur le territoire et caractérisée par de fortes irrégularités intra-annuelles et inter-annuelles.

Dans ce contexte, une véritable évaluation des ressources en eau ainsi qu'une gestion plus parcimonieuse de celle-ci sont devenues impératives (Jonch-Clausen *et al.*, 1996). En outre, la gestion des hydro-aménagements doit trouver le bon équilibre entre la ressource et l'usage. (Pabiot, 1999).

Ainsi et en raison de l'ampleur des enjeux décisionnels, le décideur ne peut plus prendre de décision hâtive et justifier un choix d'attribution fondé sur un raisonnement instinctif ou des calculs naïfs. Une bonne résolution des problèmes de gestion nécessite la connaissance de méthodes approuvées ainsi que la maîtrise des outils mathématiques et informatiques développés à cet effet.

De ce fait, la définition d'un modèle mathématique pour l'étude des problèmes de gestion dans lesquels interviennent à la fois l'aléatoire et un choix de décision présente de grandes difficultés.

L'objectif principal de ce travail est le développement d'un modèle d'optimisation de la gestion d'un barrage réservoir.

La zone d'étude choisie est le barrage de la Cheffia, en raison de la grave défaillance qu'il a rencontré en 1989/1990, et de sa redondance en 2001/2002, et du fait que ce soit l'un des rares barrages en Algérie à répondre à une gestion à buts multiples.

La modélisation sera axée sur l'optimisation de l'allocation de la ressource en eau des secteurs de l'AEP, de l'industrie et de l'irrigation, tout en garantissant un volume minimum dans le barrage ;

Ce travail est articulé autour :

- D'un premier chapitre qui consiste en une recherche bibliographique portant sur la gestion des barrages réservoirs, et les méthodes d'optimisation utilisées à cet fin, de par le monde ;

- La présentation de la zone d'étude ainsi que la critique des données recueillies ont fait l'objet du second chapitre ;
- Une analyse de la gestion passée du barrage a été traitée dans le chapitre trois.
- Le concept général, les bases théoriques, et la description de l'élaboration de notre modèle d'optimisation sont développés au chapitre quatre ;
- Le modèle élaboré est appliqué pour un scénario simulé, puis amélioré au chapitre cinq.
- Nous terminerons ce travail par une conclusion générale et des recommandations soulignant l'importance et l'originalité du travail accompli, et proposant des améliorations futures du modèle.

CHAPITRE I : THEORIE ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

L'importance que jouent les réservoirs dans la gestion de la ressource en eau n'est plus à démontrer. Le rôle essentiel d'un barrage est de réguler en absorbant la variabilité des apports : il reporte de l'eau prélevée dans une période où elle est abondante, sur une période où elle présente une plus grande valeur d'usage (Parent 1991). Pour la régularisation d'un barrage, un bon dimensionnement est nécessaire ; cependant, il est impossible qu'un dimensionnement -aussi bon soit-il- régularise entièrement l'ouvrage.

Ainsi, la capacité du barrage ne lui permettant pas de mobiliser des volumes d'eau en quantité illimitée, nous nous devons trouver une règle de gestion qui réalisera à chaque instant un compromis entre les dommages éventuels provoqués par une défaillance et l'intérêt immédiat de satisfaction des objectifs pour lesquels le barrage a été construit.

Dans ce qui suit, quelques précisions seront apportées à propos des objectifs des barrages réservoirs, car la bonne gestion d'un système passe par la définition exacte de ces derniers. De plus et nous le verrons par la suite, le caractère aléatoire des variables hydrologiques fait que la gestion des barrages réservoirs est un problème de gestion en avenir risqué ; nous tenterons alors d'apporter quelques précisions à propos de la gestion du risque, et de la prévision des apports.

I.2. Gestion des barrages réservoirs

I.2.1. Les objectifs des réservoirs

Un barrage réservoir peut être construit pour satisfaire un ou plusieurs objectifs. Ces derniers sont au nombre de sept :

I.2.1.1. Régulation des débits d'apports

L'objectif de valorisation de l'eau devient dans certains cas secondaire par rapport au soutien d'étiage ou au laminage de crue qui peuvent être des objectifs prépondérants dans les pays méditerranéens à climatologie irrégulière. Il s'agit donc d'utiliser les possibilités de stockage du réservoir en période de crues pour diminuer ou laminar celles-ci. On diminue ainsi l'ampleur et la fréquence des dégâts des eaux sur l'aval du système. (Parent 1991)

I.2.1.2. Desserte en eau d'irrigation

Souvent, les apports pluviométriques ne correspondent pas aux besoins hydriques des plantes. Le barrage peut alors réguler la distribution d'eau en fonction des demandes. Généralement, avec de l'expérience, les agriculteurs essaient de fournir une quantité d'eau proche des besoins agronomiques afin d'augmenter le rendement de la plantation.

I.2.1.3. Alimentation en eau potable

L'Alimentation en Eau Potable ou AEP concerne la population, ainsi que l'industrie ; le calcul de la quantité d'eau à allouer se fait en fonction des besoins, qui dépendent du nombre d'habitants, de leurs activités, du type de production, du nombre de travailleurs etc...

I.2.1.4. Production d'énergie électrique

Elle se fait grâce à l'énergie potentielle qu'emmagasine l'eau dans la réserve. Cet objectif est facilement modélisable, car il est clairement défini en fonction de la demande de l'usine. Il ne pose donc aucun problème lors de la gestion.

I.2.1.5. Maintien d'un niveau écologique minimum

L'aménagement d'un barrage réservoir modifie clairement le microsystème de la région, en conséquent, la faune et la flore s'en trouvent modifiées. Or, nous nous devons respecter les conditions naturelles nécessaires au bon fonctionnement des cycles afin de garantir une bonne qualité de l'eau délivrée en aval. C'est justement le rôle que jouent certains barrages.

I.2.1.6. Navigation

Pour les voies navigables, il faut assurer des vitesses acceptables, une profondeur suffisante, ainsi qu'une quantité admissible d'eau (pour le bon fonctionnement des écluses). En Algérie, cet objectif est à exclure étant donné que nous n'avons pas de voies navigables.

I.2.1.7. Plaisance

Tirer des bénéfices des ouvrages hydrauliques constitue une bonne compensation contre la détérioration des sites. Mais pour satisfaire cet objectif, les variations de niveau en période estivale doivent être les plus faibles possible. Maintenant les objectifs clairement

définis, il ne faut pas croire que la gestion de ces derniers simultanément est chose facile ; en effet, il n'est pas rare que les objectifs soient en contradiction les uns avec les autres. Citons par exemple le conflit qui existe entre les nombreux lâchers d'eaux en période de sécheresse afin de satisfaire la demande en aval, et le besoin des plaisanciers qui passe par un volume stocké important.

I.3. Gestion du risque

Rappelons que la gestion d'un barrage se fait dans un avenir incertain, et que cette particularité fait qu'il y a des risques à prendre en considération. Or, gérer, c'est prévoir, et c'est aussi savoir prendre des risques.

Cependant, il y a des limites. Effectivement, une part de l'incertitude est incontournable, c'est *l'aléa naturel*. Mais il faut agir avec beaucoup de prudence et adapter la gestion à cette incertitude. C'est l'objet des méthodes d'optimisation en avenir aléatoire, qui ont été introduites par MASSE (1946) pour la gestion des barrages-réservoirs. En outre, les incertitudes auxquelles nous sommes confrontés sont nombreuses et ont des conséquences directes sur le modèle de gestion. Elles sont généralement résumées comme suit :

I.3.1. Les incertitudes stratégiques

Les objectifs de l'ouvrage sont dynamiques ; ainsi, il arrive qu'on ne puisse les définir correctement dans le futur, et par conséquent, nous sommes dans l'impossibilité de faire une planification qui tienne la route en toutes circonstances.

I.3.2. Les incertitudes physiques

Comme nous le savons déjà, dans un modèle de gestion de la ressource en eau, les variables sont des paramètres hydrologiques, imprégnés par l'aléa ; Toutefois, pour cerner l'incertitude due à la variabilité des paramètres hydrologiques, on se sert d'outils statistiques, qui sont adaptés à ce genre de problèmes.

I.3.3. Les incertitudes technologiques

L'information qui nous sert de base pour le développement d'un modèle peut être mauvaise, insuffisante, entachée d'erreurs, ou encore discontinue. C'est ce qui est justement le plus difficile à appréhender, et malheureusement le plus rencontré dans notre pays.

I.4. Préviation des apports

Pour améliorer la gestion, et la rendre plus efficace, il est utile de prévoir le mieux possible l'évolution des apports et des besoins à venir, mais ceci constitue un problème fondamental dans l'élaboration des plans de gestion optimale des réservoirs.

Les modèles de préviation des apports sont multiples. De la modélisation pluies-débits à la neurofloue en passant par les modèles ARMA et ARMAX ou encore l'Analyse en Composantes Principales, tous ont des avantages et des inconvénients, et il convient au modélisateur de faire le bon choix de l'outil de préviation selon les données disponibles.

I.5. Evaluation de la performance d'une gestion

La procédure de gestion fixe les consignes de gestion pour le réservoir. Il s'agira par la suite de confronter les règles trouvées à la réalité en simulant le fonctionnement par des données réelles.

L'introduction d'indices de performance (IPs) permet de juger de la qualité de la règle de gestion lors de la simulation des règles déjà optimisées. A présent, il ne suffit plus de créer une règle de gestion, il faudra en plus évaluer la fiabilité de cette dernière. Des efforts importants ont été faits du côté des chercheurs pour prendre explicitement en compte la fiabilité de la gestion des réservoirs, car son importance n'est plus à démontrer.

Les avancées les plus importantes dans ce champ ont commencé avec le travail sur la programmation à contraintes de chance de ReVelle et al. (1969), qui a été ultérieurement étendu par exemple par ReVelle & Kirby (1970), Eastman & ReVelle (1973), ReVelle & Gundelach (1975), Gundelach & ReVelle (1975), Loucks & Dorfman (1975), Houck (1979), Houck & Datta (1981) et plusieurs autres auteurs, incluant les travaux sur la programmation de fiabilité de Simonovi & Mariño (1980, 1981, 1982).

Les indices de performances sont nombreux, et il revient au gestionnaire de choisir ceux qu'il devra utiliser, et ce, en fonction des caractéristiques du système, ainsi que de ses priorités. En outre ces indices doivent traduire les incidents qu'il y a eu lors de la simulation de la règle de gestion.

Par analogie à la description des précipitations, les incidents vont être décrits selon trois indices de performance caractérisant l'intensité, la durée et la fréquence du phénomène.

Nous pouvons citer les exemples suivants, extraits de l'étude de Jendoubi (1998):

- ✓ **Le risque (fréquence) :** probabilité de voir à un instant donné, l'événement en question se réaliser.
- ✓ **La résilience (durée):** estimation du temps moyen au bout duquel le système retourne à un état satisfaisant lorsque s'est produit un incident.
- ✓ **La vulnérabilité (intensité):** mesure de l'ampleur du risque, c'est à dire la répercussion moyenne d'un incident sur la ressource pour l'utilisateur.

Majid Mathlouthi & Fethi Lebdi (2008), ont désigné les indices de fiabilité suivants :

- ✓ **Fiabilité basée sur la quantité : IP(1)**

$$IP(1) = \frac{F}{B}$$

Où : F est la quantité réelle de fourniture produite pendant la période considérée; et B est le niveau de la demande ciblée pendant la période considérée égale à T étapes.

- ✓ **Fiabilité basée sur le temps : IP(2)**

$$IP(2) = \frac{T - \sum_{t=1}^T f_t}{T}$$

Où : f est la durée du déficit survenant dans l'étape temporelle (événement) t; elle vaut 1 quand le déficit survient et 0 quand la demande ciblée peut être satisfaite; et T est le nombre d'étapes (événements) considéré.

- ✓ **Fiabilité basée sur l'occurrence : IP(3)**

Le nombre total de périodes est défini ici comme le nombre total de périodes déficitaires consécutives et non déficitaires consécutives. Supposons qu'au cours de (T) pas de temps d'une politique de gestion, il arrive d'y avoir (I) périodes non déficitaires consécutives et (J) périodes déficitaires consécutives, le nombre total de périodes est égal à (I + J). La fiabilité basée sur l'occurrence peut être alors calculée comme:

$$IP(3) = \frac{I}{I+J}$$

✓ **Somme rapportée à la variance de la déviation à la cible au carré : IP(4)**

$$IP(4) = \left[\frac{\sum_{t=1}^T (D_t - S_t)^2}{\sum_{t=1}^T D_t^2} \right]^{1/2}$$

Où : D_t est la demande dans l'étape t ; et S_t est la fourniture dans l'étape t .

Si: $S_t \geq D_t$ alors $S_t = D_t$,

Sinon: $S_t = S_t$.

✓ **Temps moyen de défaillance : IP(5)**

$$IP(5) = \frac{\sum_{i=1}^N f_i}{N}$$

Où : f_i est la durée du $i^{\text{ème}}$ incident de déficit (événement) ; et N est le nombre total d'incidents de déficit dans T étapes.

✓ **Temps inter-événements moyen : IP(6)**

$$IP(6) = \frac{\sum_{i=1}^M n_i}{M}$$

Où : n_i est la durée du $i^{\text{ème}}$ incident de non-déficit (événements); et M est le nombre total d'incidents de non-déficit dans T étapes.

✓ **Déficit moyen par événement : IP(7)**

$$IP(7) = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N}$$

Où : d_i est le volume du $i^{\text{ème}}$ déficit; et N est le nombre total d'incidents de déficit dans une période de temps de T étapes.

✓ **Résilience : IP(8)**

La résilience est définie comme la plus longue durée d'événements de déficits consécutifs (Nandalal & Bogardi., 1996). Dans cette étude, le modèle de planification de la gestion du barrage est dérivé sur la base événementielle. La résilience est ainsi formulée comme le nombre maximum d'événements (secs et pluvieux) consécutifs de pénurie.

✓ **Vulnérabilité : IP(9)**

Les indicateurs de fiabilité présentés précédemment peuvent être adéquats pour l'évaluation à long terme de la performance, cependant ils sont insuffisants et inadéquats pour rendre compte d'un événement rare ou extrême de déficit qui peut arriver au cours de la durée de vie des réservoirs. La vulnérabilité est la mesure qui décrit l'ampleur du plus grand record d'événement de déficits.

$$IP(9) = \max_t [\max(0, D_t - R_t)]$$

Où : D_t est la demande totale imposée au barrage; et R_t est la lâchure totale utilisable au pas de temps t .

✓ **Nombre de déficits observés : (NDO)**

Est considéré pour sa valeur pratique et psychologique, il consiste à calculer, comme son nom l'indique, le nombre de déficits observés.

✓ **RL de fiabilité : (RL)**

$$RL = (1 - \frac{TNF}{T}) 100$$

Où : TNF est le nombre total d'événements (secs et pluvieux) déficitaires dans la période simulée; et T est le nombre d'étapes (événements) considéré.

Il a été conclu qu'il est essentiel de tenir compte de la fiabilité basée sur la quantité IP(1), du temps moyen de défaillance et du temps inter-événements moyen IP(5) et IP(6), et du déficit moyen par événement IP(7) comme informations pour le décideur dans le domaine de la gestion des barrages réservoirs. En outre, la résilience IP(8) et la vulnérabilité maximale IP(9) pourraient être particulièrement considérées dans le cas du comportement prudent du décideur, puisque ces deux indices sont des mesures du plus grand et du plus sévère déficit.

Maintenant que les bases de la gestion des barrages réservoirs sont décrites, nous comprenons la nécessité de devoir améliorer en continu la gestion utilisée ; L'idéal serait de parvenir à une gestion que nulle autre ne surpasserait. Pour parvenir à cette fin, des techniques sont nombreuses, et sont dites : d' « optimisation » et c'est sur ces dernières que nous nous pencherons dans la partie suivante.

I.6. Optimisation de la gestion d'un barrage

L'importance grandissante accordée à la ressource en eau fait que la tendance des travaux de recherche actuels porte sur les tentatives de recherche des méthodes d'optimisation de la gestion des barrages-réservoirs les plus fiables possibles.

Dans ce qui suit, les notions d'optimisation, et d'optimisation mathématique, seront explicitées. Aussi, la description exhaustive des méthodes existantes étant une tâche quasiment impossible à entreprendre dans le cadre du présent mémoire, seuls quelques repères ainsi que les principales applications de ces méthodes dans le domaine de l'exploitation des barrages-réservoirs seront décrites.

I.6.1. Notion d'optimisation

L'optimisation vient du latin *optimum* signifiant *le meilleur*. Selon la définition du Larousse, optimiser c'est donner à quelque chose les meilleures conditions d'utilisation, de fonctionnement ou de rendement.

Actuellement, l'optimisation se trouve être utilisée dans tous les systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique. Cependant, la qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens utilisés pour le traitement numérique. Aussi, il ne faut pas oublier qu'afin d'arriver à une bonne optimisation, la réflexion est un instrument indispensable, et ce quelque soit la qualité des outils mathématiques employés.

Dans la théorie Darwinienne (de l'évolution), les individus possédant les caractéristiques les plus adaptées à leur environnement (*optimales*) auront les meilleures chances de survie ; il en découle que l'optimisation est une condition nécessaire à la prospérité des êtres vivants. Il en est de même pour les systèmes issus du génie de l'Homme, dont la pérennité n'est assurée que grâce à des fonctionnements optimaux.

La recherche et la détermination du meilleur élément d'un ensemble selon un critère quantitatif donné, avec des méthodes analytiques ou numériques constituent l'optimisation mathématique. En d'autres termes, le problème consiste à trouver des solutions satisfaisant un objectif quantitatif tout en respectant d'éventuelles contraintes.

I.6.2. Formulation mathématique

En mathématique, un problème d'optimisation est défini par différents composants :

- ✓ Un modèle du système à optimiser ;
- ✓ Des variables ;
- ✓ Des contraintes ;
- ✓ Une ou plusieurs fonctions objectif.

Il prend la forme suivante :

Étant donné une fonction $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ d'un ensemble A dans l'ensemble des nombres réels. Rechercher un élément x_0 de A tel que :

- $f(x_0) \geq f(x)$ pour tous les x en A (pour une maximisation)
- $f(x_0) \leq f(x)$ pour tous les x en A (pour une minimisation).
- ✓ Les éléments appartenant à l'ensemble A sont les *solutions admissibles*,
- ✓ La fonction f est appelée : *fonction objectif*
- ✓ L'élément x_0 est la (ou une) *solution optimale*.

Lorsqu'on est confronté à un cas pratique d'optimisation, la première chose à faire est la détermination de l'ensemble des composantes décrites ci-dessus, les liens entre elles et leurs comportements. Cette opération peut être effectuée grâce à une modélisation du système. On passe ensuite à la détermination des variables (paramètres sur lesquels on peut agir afin de modifier le comportement du système). Puis les contraintes, qui constituent le domaine de validité de ces variables ou des composantes du système.

Dans le cas d'un barrage réservoir, elles peuvent être par exemple d'ordre physique (capacités de transfert et de stockage limitées) ou d'ordre institutionnel (seuil minimum dans les pays arides et semi-aride pour garantir un niveau écologique). La fonction objectif est définie suite à une réflexion approfondie à propos des buts de l'optimisation ; il faut donc se poser les bonnes questions. Une fonction objectif peut contenir de nombreux optima (maxima ou minima) : ce sont des optima locaux, dont il est important d'énoncer la définition :

Un maximum local x^* est défini comme un point de A pour lequel il existe un voisinage A de x^* tel que :

Pour tout $x \in V \cap A$, $f(x) \leq f(x^*)$; dans ce voisinage de x^* , les valeurs de la fonction dominent la valeur en ce point. Lorsque A est un sous-ensemble de \mathbb{R}^n , ou plus généralement d'un espace vectoriel normé, la définition est équivalente à l'existence d'un $\delta > 0$ tel que, pour tout $x \in A$ satisfaisant $\|x - x^*\| \leq \delta$, on a $f(x) \leq f(x^*)$. Un minimum local est défini de la même manière.

Il est généralement aisé de déterminer numériquement des optima locaux. Or, la difficulté majeure à laquelle nous sommes confrontés est de trouver l'*optimum global* d'une fonction, c'est-à-dire la valeur de la fonction objectif qui surpasse toutes les autres. Et comme l'a dit Pareto (Pareto, 1896) : « Une solution est optimale si aucune autre solution ne l'égalise ou la surpasse de tout point de vue simultanément ». (Le terme : « simultanément » fait référence aux problèmes multi objectifs.)

I.6.3. Méthodes d'optimisation

Il est important de relever aussi, pour la bonne compréhension de tous, que le terme d'optimisation est souvent remplacé par celui de programmation, mais qu'il ne fait pas allusion à une programmation informatique mais bien à une optimisation ; en effet, il vient de l'usage du mot programme par les forces armées américaines pour établir des horaires de formation et des choix logistiques optimaux.

I.6.4. Optimisation analytique

L'optimisation d'un problème peut se faire analytiquement et de manière simple si l'entièreté de la fonction objectif f peut être formulée mathématiquement, avec une fonction à une ou plusieurs variables ; ainsi, il suffira de rechercher les solutions pour lesquelles la dérivée totale est nulle.

Les minima et maxima (donc, les extrema) sont les points dont la deuxième dérivée est positive, respectivement négative. Il sera néanmoins nécessaire d'évaluer chacun des extrema afin de déterminer l'optimum global. En pratique, il est difficile d'exprimer la fonction objectif par une expression mathématique. L'on comprend alors que l'usage de l'optimisation analytique est limité. Ainsi, lorsque la dérivée ne peut être décrite, il devient nécessaire d'utiliser des méthodes *itératives*. La méthode du *gradient*, ou encore celle de *Newton*.

Il existe aussi une autre méthode à laquelle on peut tout de suite penser, et qui peut nous permettre d'atteindre avec certitude l'optimum global d'une fonction objectif unique, c'est l'*énumération*. Celle-ci mémorise et évalue la fonction objectif sur tout l'espace des solutions pour n'en retenir finalement que la valeur minimale. Mais on comprend de suite que le temps de calcul est énorme et que cette méthode n'est pas toujours applicable.

I.6.5. Programmation linéaire (Linear programming LP)

Elle étudie le cas où la fonction objectif et les contraintes caractérisant l'ensemble des solutions potentielles sont linéaires.

Remarque : Une équation est dite *linéaire* lorsqu'elle se présente sous la forme $u(x)=b$, où u est une application linéaire entre deux espaces vectoriels E et F , b est un élément donné de F . On recherche l'inconnue x dans E .

Une résolution graphique est possible pour les fonctions à deux variables. Lorsque les systèmes sont plus compliqués, l'algorithme du simplexe permet leur résolution (Dantzig, 1982). Malheureusement, la programmation linéaire a pour principal défaut le fait de ne pas pouvoir exprimer et représenter le problème correctement par des fonctions linéaires. Des extensions de cette méthode ont alors été trouvées, telles que la programmation linéaire en nombre entier (Integer Linear Programming, ILP), ou mixte (Mixed ILP, MILP).

De nombreux auteurs ont utilisé cette technique d'optimisation dans le cadre de l'exploitation de systèmes d'aménagements hydroélectriques à accumulation, à l'exemple du modèle SISOPT au Brésil (Barros et al., 2003). Ce modèle utilise la LP pour la génération d'une bonne solution initiale avant de formuler le problème de manière non linéaire dans la région choisie. Cette combinaison n'est pas nouvelle (Yeh et al., 1979) et possède toujours de nombreux adeptes (Westphal et al., 2003). La rapidité de l'optimisation par la LP la rend aussi intéressante en phase de planification (Barros et al., 2003) et pour l'analyse de variantes.

Il est important de dire que généralement, la résolution du problème par LP se fait de manière déterministe, c'est-à-dire que l'on considère les données d'entrées comme étant fiables. Par conséquent, l'incertitude est négligée. Or, l'aléa avec lequel l'apport en eau dans la gestion des réservoirs est à prendre en considération, et ce, en incluant une composante stochastique dans les modèles afin de déterminer la solution optimale au sens probabiliste du terme, celle dont la fonction objectif aura l'*espérance* la plus élevée.

Des balbutiements proposant un modèle théorique d'un réservoir dont l'apport était un processus Makovien (Manne, 1962) aux modèles plus élaborés de *LP stochastique récursive* ou *Chance-Constrained LP* (ReVelle et al., 1969), ces méthodes utilisent en général des règles d'exploitation rigides des réservoirs optimisées pour le long terme appelées *Linear Decision Rules* (Yeh, 1985). Certains auteurs en ont profité pour traiter l'incertitude par la logique floue (que l'on décrira plus loin) (Zadeh, 1965). Dans ce domaine, Jairaj and Vedula (2003) ont utilisé la LP pour définir les bornes de la fonction d'appartenance, elles-mêmes à nouveau introduites dans le problème LP, tandis que Kumar et al. (2001) ont introduit la logique floue pour définir la fonction objectif.

Dans le domaine, la LP est fréquemment utilisée en raison de son efficacité, ainsi que sa rapidité pour les problèmes à grande échelle. Aussi, elle permet de déterminer l'optimum global et ne nécessite pas de solution initiale. En revanche, elle n'est appliquée que pour les planifications à long terme. Or, dans certains cas de gestion de réservoir, nous avons besoin de réduire le pas de temps, allant même jusqu'au mensuel, ou à l'hebdomadaire. En outre, la nécessité de simplifier le système et de linéariser la fonction objectif et les contraintes constitue l'un des points noirs les plus importants de la méthode.

I.6.6. Programmation non linéaire (non-linear programming - NLP)

Cette méthode a été formulée afin d'avoir une meilleure formulation du problème et ce, en évitant les trop grandes simplifications (comme dans le cas de la LP). Il en découle toutefois que le fait de ne pas formuler le système par des fonctions linéaires rend le problème difficile à optimiser. Ainsi, la convergence est plus lente en comparaison avec la LP, et on ne peut avoir la certitude de trouver l'optimum recherché, dans le cas où la fonction n'est pas convexe. Cela dit, nous pouvons avoir une bonne précision lors du calcul d'optimum local.

La *programmation quadratique* (Successive Quadratic Programming - SQP) exploite la propriété de certains algorithmes de mieux approcher les problèmes non-linéaires que les linéaires, mais elle nécessite que les contraintes restent linéaires. Cette méthode plus complexe peut se révéler efficace pour l'optimisation de sous-problèmes (Barros et al., 2003), mais devient difficilement utilisable pour une approche stochastique (ou certaines contraintes dépendent de variables aléatoires). De plus, le temps de calcul en SQP augmente de manière exponentielle avec le nombre de pas de temps (Tejada-Guibert et al., 1990).

En outre, il est possible de résoudre des problèmes d'optimisation non-linéaires par une approximation linéaire d'une partie de la fonction non-linéaire (linéarisation) en ne retenant que le terme de premier ordre aux alentours d'un point connu. Ou alors, passer par la génération d'un nouveau problème LP à chaque itération, mais dans un domaine limité (Barros et al., 2003). Cette méthode est devenue populaire, car de nombreux codes LP existent et peuvent être utilisés. De plus, elle converge environ dix fois plus rapidement que les méthodes NLP (Hiew, 1987), mais pas forcément vers l'optimum global (Bazarra et al., 1993).

I.6.7. Programmation dynamique (dynamic programming)

Elle utilise la propriété qu'une solution optimale se compose nécessairement de sous-solutions optimales (le contraire n'est pas vrai en général). Elle est utilisable lorsque la fonction objectif est une somme de fonctions monotones croissantes dont les arguments sont des inconnues distinctes. Nous pouvons utiliser la DP pour déterminer l'opération optimale d'un réservoir en temps réel.

D'ailleurs, Yeh et al. (1979) s'en sont servi pour optimiser un système de plusieurs réservoirs à pas de temps horaire et 24 h en avance pour la production hydroélectrique, tandis que Karamouz et al. (2005) l'ont utilisé pour le choix des débits mensuels d'irrigation, d'eau potable, et de production d'électricité. Une autre manière permet le calcul des opérations optimales pour l'établissement de règles d'exploitation rigides.

De cette manière, Cancelliere et al. (2005) utilisent la DP pour le calcul des débits mensuels optimaux pour l'irrigation en fonction du débit entrant et de la demande. Ces lâchers d'eau optimaux sont ensuite exploités pour le développement d'un système de type *neuro-fuzzy*, combinaison entre réseaux de neurones et logique floue. D'autres auteurs ont utilisé la DP de la sorte, tels Rao et al. (2001) pour des objectifs d'irrigation et de protection contre les crues à pas de temps mensuel, Russel and Campbell (1996) pour la production hydroélectrique mensuelle, Stam et al. (1998) pour la production hydroélectrique mensuelle et la protection contre les crues jusqu'à une année en avance, et Lobbrecht et al. (2005) pour la gestion du remplissage de polders à très court terme (6 pas de 15 min en avance).

I.6.8. Réseaux de neurones artificiels

Plus couramment utilisés pour des tâches telles que la classification et la reconnaissance de processus, les réseaux neurones ne sont généralement pas utilisés pour

l'optimisation, mais il faut leur attribuer quelques caractéristiques qui jouent en leur faveur telles que la prise en compte implicite de l'incertitude ainsi qu'une grande rapidité de calcul, qui est adaptée au calcul stochastique.

Dans le domaine des barrages, ils sont utilisés pour la génération de règles d'exploitation implicites des réservoirs grâce à leurs performances pour la reconnaissance des structures. En effet, ils doivent automatiquement passer par des modèles d'optimisation déterministes que nous avons cités précédemment, afin d'accomplir le processus d'apprentissage nécessaire. Raman and Chandramouli, 1996; Chandramouli and Raman, 2001; Rao et al., 2001; Cancelliere et al., 2005) se sont tous penchés sur la question et ont obtenu des résultats intéressants.

I.6.9. Logique Floue

Formalisée par Lotfi Zadeh en 1965, la logique floue est utilisée en intelligence artificielle. Cette théorie est une extension de la théorie des ensembles classiques pour la prise en compte d'ensembles définis de façon imprécise. Dans les cas de problèmes dont les lois de comportement sont mal connues, ou sont fortement non-linéaires, cette méthode s'avère être particulièrement performante.

Aussi, elle présente la spécificité de pouvoir intégrer des informations de mauvaise qualité ou difficilement quantifiables et elle ne nécessite pas d'hypothèses sur les variables d'entrées. Il est à noter que la logique floue constitue une approche radicalement différente de la théorie des probabilités, car contrairement à elle, elle n'associe pas d'espérance à une variable mais une valeur.

De ce fait, elle convient parfaitement aux problèmes de prise de décision dans un environnement où les paramètres à considérer ainsi que leurs incertitudes sont importantes et difficilement quantifiables. Le développement d'un modèle en logique floue n'est vraiment pas une mince affaire ; il nécessite une certaine expertise et un grand nombre d'itérations. Les étapes principales constituant cette méthode sont :

- ✓ Création des fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie (fuzzification)
- ✓ Définition des règles du moteur d'inférences (nécessite une base de règles et de définitions)
- ✓ choix d'une méthode de défuzzification

Malgré la difficulté de son utilisation, nous pouvons trouver dans la littérature de nombreux auteurs ayant travaillé avec la méthode de la logique Floue pour la régularisation des barrages réservoirs uniques à buts multiples ; nous pouvons citer par exemple :

- ✓ Kumar et al. (2001) : ils ont déterminé la production mensuelle à atteindre du réservoir Hirakud en Inde pour l'irrigation et la production hydroélectrique.
- ✓ Jairaj and Vedula (2003) : ils ont élaboré un modèle où l'ETP est évaluée grâce à la logique floue, et ce, pour l'utilisation mensuelle du Krishna basin en Inde pour l'irrigation
- ✓ Russel and Campbell (1996) ont travaillé sur l'optimisation de la production hydroélectrique mensuelle d'un réservoir sur la rivière Powell au Canada en fonction des apports et du prix du marché.
- ✓ Shrestha et al. (1996) ont présenté dans leur article de référence un système d'aide à la décision pour le Tenkiller Lake en Oklahoma, où la production journalière doit satisfaire des objectifs multiples (production hydroélectrique, irrigation, protection contre les crues et navigation) en fonction des entrées que sont les apports dans la retenue, son niveau actuel, le mois et la demande énergétique prévue.
- ✓ Cancelliere et al. (2005), ont évalués par combinaison linéaire des sorties d'un moteur d'inférences de type *fuzzy*, les rejets journaliers du réservoir de Pozzillo en Italie pour l'irrigation.
- ✓ Lobbrecht et al. (2005) ont utilisé la logique floue pour l'optimisation du pompage de multiples polders de manière similaire à un ANN pour produire les mêmes résultats que par *DP*.
- ✓ Karaboga et al. (2004) ont comparé un système *fuzzy* à des règles rigides et un système classique de contrôle d'écarts pour la gestion horaire du réservoir Catalan en Turquie.

Il est à noter tout de même que la logique floue n'est pas, ou très peu utilisée pour le développement d'outils d'aide à la décision pour les réservoirs multiples.

I.6.10. Métaheuristique

Pour résoudre des problèmes difficiles, des techniques ont été conçues pour déterminer des solutions qui ne sont pas rigoureusement optimales, mais qui s'en approchent. Ces méthodes se basent généralement sur des phénomènes physiques, biologiques, socio-psychologiques ou font appel au hasard.

En outre, ces méthodes ne s'excluent pas mutuellement, et on ne peut pas être sûrs de l'efficacité d'une méthode lorsqu'elle est appliquée à un problème donné. En outre, la tendance actuelle est aux modèles hybrides, qui tirent des avantages de différentes approches en les combinant.

On parle de *méta*, du grec « au-delà » (comprendre ici « à un plus haut niveau »), *heuristique*, du grec qui signifie « trouver ». En effet, ces algorithmes se veulent des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé.

Les métaheuristiques sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims particuliers).

Comme nous allons nous intéresser, dans ce mémoire, à la méthode des algorithmes génétiques, nous allons nous approfondir d'avantage dans leurs diverses utilisations passées.

I.6.11. Domaines d'utilisation des Algorithme génétiques

Les techniques d'optimisation à objectifs multiples sont employées couramment dans la gestion de la ressource en eau, et il est facile de les appliquer une fois que les fonctions objectifs et les contraintes sont formulées.

Les algorithmes évolutionnaires en tant que techniques d'optimisation robustes ont la capacité de trouver des solutions optimales multiples de Pareto ; ce sont des méthodes stochastiques à usage universel simulant la sélection naturelle et l'évolution biologique. Ils gardent ainsi une population (ou un candidat) parmi les solutions potentielles proposées.

De nos jours, nous avons plusieurs algorithmes évolutionnaires produisant les solutions optimales de Pareto en peu de minutes, les résultats produits par ces algorithmes sont très utiles pour des décideurs qui assurent la distribution équitable de la ressource pour les différents usagers. L'approche la plus répandue pour résoudre les problèmes de gestion avec contraintes est l'emploi de pénalités.

L'algorithme évolutionnaire le plus populaire est l'algorithme génétique, dans le domaine de la gestion de la ressource en eau est en particulier la gestion des barrages-

réservoirs. Plusieurs travaux de recherche ont montré que les algorithmes génétiques constituent des outils puissants quelque soit leurs types (codage réel ou binaire). Ces algorithmes ont été appliqués avec succès pour l'optimisation de la gestion de la ressource, et leurs performances ont été prouvées en les comparant avec les méthodes classiques comme la programmation linéaire, la programmation non linéaire et la programmation dynamique.

Dans ce qui suit, nous allons exposer quelques travaux de recherche qui ont été faits par le biais des algorithmes génétiques dans le domaine de l'optimisation de la gestion de la ressource en eau :

- ✓ C.L. Chang et al. (2006) ont appliqué les algorithmes génétiques pour l'interpolation et l'estimation des données manquantes des précipitations, ils ont considéré la méthode des algorithmes génétiques comme une technique nouvelle qui donne de meilleurs résultats par rapport aux méthodes classiques à condition qu'elle soit utilisée avec précaution.
- ✓ C.L. Chang (2008) a proposé un modèle d'optimisation de lutte contre les inondations en temps réel en utilisant les algorithmes génétiques comme outil de recherche, il a été employé pour rechercher un optimum global, l'auteur a expliqué qu'il est très difficile d'aboutir à une solution optimale sans la violation de quelques contraintes. Pour aborder ce problème, une stratégie de pénalité appropriée a été proposée pour guider l'algorithme dans son processus de recherche. L'approche proposée est appliquée au réservoir de Shihmen situé en Taiwan pour trouver les lâchers optimaux.
- ✓ C.L. Chang et al. (2009) ont utilisé l'algorithme génétique pour optimiser un système multi-réservoirs ; les réservoirs de Shihmen et de Feitsui sont considérés comme les plus importants au Nord de Taiwan ; le premier réservoir souffre d'un problème sérieux de manque d'eau, tandis que le second réservoir a un surplus, ces deux réservoirs sont gérés indépendamment par deux services gouvernementaux. L'utilisation de l'algorithme génétique aide à optimiser la gestion conjointe de ces deux réservoirs afin d'évaluer les stratégies communes de gestion optimale et augmenter l'efficacité de l'utilisation de la ressource en eau.
- ✓ C.L. Chang et al. (2010), ont proposé une méthodologie en utilisant un algorithme génétique avec comme contrainte le débit écologique minimum, en outre, un certain nombre de pénalités ont été proposées pour formuler la fonction objectif. D'après ces auteurs, les gestionnaires ont toujours tendance à négliger les aspects

environnementaux, la méthode proposée a pu améliorer de manière significative l'efficacité de l'approvisionnement en eau tout en respectant un débit écologique minimum et donc optimiser la gestion de ce réservoir.

- ✓ C.L. Chang et al. (2011) ont développé un modèle de planification et de gestion conjointe de la ressource en eau au niveau régional. Le modèle intègre la programmation linéaire et un algorithme génétique à objectifs multiples, ce modèle a fourni une courbe de différence des différentes demandes et pour les différents secteurs et peut servir de base pour quantifier les besoins futurs.
- ✓ Selon T. Akar et al. (2004), l'intégration de l'incertitude augmente la complexité d'un problème, dans cette étude, les auteurs ont envisagé deux types d'incertitudes : l'incertitude associée à l'expression des fonctions de pénalité et l'incertitude dans l'évaluation des lâchers ; la logique floue a été utilisée pour modéliser ces incertitudes. L'optimisation des paramètres fuzzifiés a été réalisée grâce à un algorithme génétique avec le double objectif : minimiser la pénalité totale et maximiser le degré de satisfaction du gestionnaire, la formulation proposée a été appliquée au barrage Green de Kentucky aux Etats Unies. D'après ces auteurs, cette méthode offre une plus grande flexibilité pour la prise de décision.
- ✓ M.S. Hashemi et al. (2008) ont employé l'algorithme génétique pour optimiser la gestion du réservoir de Jiroft, dans cette étude la boîte à outils des algorithmes génétiques a été utilisée sous Matlab, ils ont montré qu'en utilisant le codage réel d'une population, l'algorithme donne de meilleurs résultats.
- ✓ M. Kai et al. (2010) : Dans cette étude, un algorithme génétique est appliqué pour gérer quatre barrages en cascade dans le fleuve de Wujian province de Guizhou de la Chine. Un modèle d'optimisation est établi, l'objectif est d'avoir une génération de débit annuel maximale avec de fortes probabilités. L'algorithme génétique est appliqué pour simuler les stratégies de gestion basées sur une série de données de 10 années. Deux autres algorithmes tels que la programmation dynamique avec approximation successive et la programmation dynamique différentielle discrète sont également appliqués pour évaluer l'exécution de la simulation. Les résultats ont montré que la génération annuelle et la forte probabilité du système de quatre barrages en cascade dérivé de l'algorithme génétique sont meilleurs que ceux donnés par les méthodes classiques.
- ✓ J.Sreekanth et al. (2010) ont développé un modèle d'optimisation en utilisant un algorithme génétique ; ce modèle permet la gestion des aquifères côtiers pour

optimiser les pompages et éviter ainsi, l'intrusion d'eau salée dans les nappes profondes.

CHAPITRE II: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Généralités

Les premiers développements modernes de la région d'Annaba se sont faits à partir des eaux souterraines, tant pour les eaux potables et industrielles que pour l'agriculture qui profite d'une pluviosité abondante.

Cependant, comme il fallait satisfaire des besoins importants de façon sûre, la nécessité de construire un barrage s'est imposée, et les études entreprises ont montré l'intérêt du site de la Cheffia sur l'Oued Bou-Namoussa à 50 Km au Sud Est d'Annaba. Ce barrage a ainsi été entrepris dans un quadruple but :

- ✓ Irriguer les bonnes terres de la partie orientale de la plaine d'Annaba autour de Asfour, Zerizer, et Ben Mhidi (actuellement, le périmètre irrigué est celui de la plaine de la Bounamoussa : 16000 ha) ;
- ✓ Fournir l'eau nécessaire à l'industrie et en premier lieu à la sidérurgie d'El Hadjar ;
- ✓ Alimenter en eau la ville d'Annaba, ce qui permettra de déclasser les installations anciennes peu sûres fournissant une eau médiocre tout en satisfaisant les besoins à long terme ;
- ✓ Limiter en partie les inondations du marais de N'Krada à l'aval du barrage.

L'ensemble de l'aménagement hydraulique comprend l'ensemble des éléments suivants, de l'amont à l'aval :

- ✓ Le barrage de la Cheffia ;
- ✓ Une conduite de diamètre Ø1500 mm du barrage jusqu'à Zerizer fournissant de l'eau agricole aux prises de Asfour et Zerizer ;
- ✓ Une conduite de diamètre Ø930 mm de Zerizer jusqu'à Bou-Hadjar. (22.5Km) ;
- ✓ La station de traitement des eaux de Bouhadjar ;
- ✓ Une conduite de diamètre Ø930 mm de la station à l'entrée de la ville (5Km) ;
- ✓ Les installations sidérurgiques sont alimentées par les eaux brutes par un diamètre Ø600 mm branché sur le réservoir d'eau brute de la station de traitement, et par un tuyau branché sur le réservoir d'eau traitée de cette station, notamment pour la cité ;

- ✓ Le périmètre d'irrigation est alimenté à partir du piquage sur le Ø1500 (Asfour et Zerizer), puis à partir d'une station de reprise dans l'oued établie à l'amont du barrage anti sel aux environs du pont de la R.N. 44 sur l'Oued Bounamoussa.

II.2. Historique des travaux

La première reconnaissance géologique a été entreprise en 1927 par J. SAVORIN. Ce n'est qu'en 1946 que la campagne d'étude hydrologique a été lancée, avec l'installation d'une station de jaugeage un peu en aval du site du barrage actuel.

En 1947, on a commencé à parler de construction du barrage de la Cheffia dans le cadre du plan décennal de développement de l'Algérie (1947-1957). Quatre années plus tard, c'est-à-dire en 1951, l'étude géologique a enfin été lancée. L'ouvrage a été réalisé entre Octobre 1960 et Octobre 1964 par les entreprises suivantes :

- ✓ La Société des Travaux Souterrains (Entreprise Pilote) ;
- ✓ La Compagnie Industrielle de Travaux (C.I.T.R.A.) ;
- ✓ La Société Générale d'Entreprises (S.G.E.A.) ;
- ✓ Les Entreprises Brun ,Botella et Sotundef ;
- ✓ Le Bureau d'Etudes : SOFRETEN.

La mise en eau a commencé au mois de Février 1965 et s'est poursuivie jusqu'en 1969. Les allocations en eau pour l'AEP ont débuté en 1970. L'allocation en eau pour l'industrie a débuté en Juin 1979. L'allocation pour l'irrigation a quant à elle débuté sérieusement à partir de juin 1977.

II.3. Les ouvrages

II.3.1. Digue

L'ouvrage est constitué d'une digue en terre compactée avec masque amont d'étanchéité en argile. De l'amont vers l'aval, la digue est constituée de : rip-rap en enrochement, filtre sous rip-rap, recharge amont en alluvions. Volume total des remblais : 1.3 million de m³.

Tableau n °II-1 : Caractéristiques de la digue du barrage de la Cheffia

Côte de la crête	Largeur de la crête	Longueur à la base	Longueur en crête
169.0 m	10.0 m	214.0 m	650.0 m

II. 3.2. Evacuateur principal

En puits avec seuil déversant et galerie de fuite, il comprend une vanne de type cylindrique d'un diamètre de $\varnothing 16.50$ m et une hauteur de 7.90 m. Son débit d'évacuation est de $1800 \text{ m}^3/\text{s}$. Le niveau du seuil déversant est de 159.50 m. Lorsque la vanne est en position de fermeture complète, le niveau atteint les 165.732 m.

II.3.3. Vidange de fond

Deux (02) pertuis sont incorporés dans le socle de la tour de l'évacuateur et débouchent dans la galerie de fuite. Cette dernière est commune ; elle sert pour l'évacuation et pour la vidange de fond. Section rectangulaire ($l = 10.69$ m ; $h = 11.84$ m). longueur : 156.50 m ; débit d'évacuation : $200 \text{ m}^3/\text{s}$.

II.3.4. Ouvrages de prise

Les prises d'eau sont incorporées dans la tour de l'évacuateur de crue, dont 4 pertuis étagés dans la pile avale, 01 prise dans la pile amont rive gauche, 01, dans la pile amont rive droite. L'eau est véhiculée dans 02 conduites de 1.00 m de diamètre pour l'une, et 1.50 m pour l'autre. Les niveaux des prises de la pile aval sont : 138.50, 146.00, 153.50 et 161.00 (Prises pour l'alimentation de la conduite n°01). Celles de la pile amont, sont à la cote 133.26 m (constituant la cote du seuil des prises d'eaux d'irrigation.).

Tableau n° II-2 : Caractéristiques des ouvrages de prise du barrage de la Cheffia.

Cotes	Volumes correspondants
Première prise: 138.50 m	1.749 hm^3
Deuxième prise : 146.00 m	22.369 hm^3
Troisième prise : 153.50 m	63.416 hm^3
Vanne clapet : 161.00 m	121.063 hm^3
Prise d'irrigation : 133.26 m	0.001 hm^3
Vidange de fond : 127.00 m	/
Volume mort : 144.90 m	/

II.4. Caractéristiques du bassin versant

II.4.1. Aperçu sur le Bassin de Mefragh

Le bassin de la Mefragh forme le versant Nord du dernier tronçon de la chaîne septentrionale de l'Atlas Tellien constituée par les monts de Medjerdah en Algérie, et les monts Krounirio en Tunisie.

Il couvre une superficie de 2600 Km² environ, longeant la côte de 70 Km. La Mefragh est constituée par la réunion de deux grands Oueds : L'Oued Bounamoussa à l'Ouest, et l'Oued Kebir à l'Est. Elle se jette dans la méditerranée par un étroit couloir à travers le massif dunaire du littoral : ainsi, en période de crues, la majeure partie des apports inonde la pleine, formant un vaste marécage au pied de la chaîne numéduque de Bone à la Calle. (Figure n°II-1)

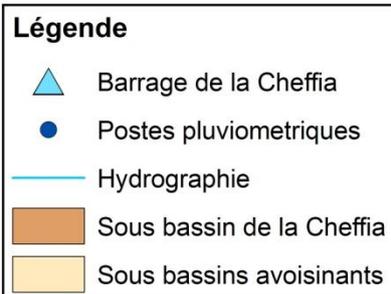
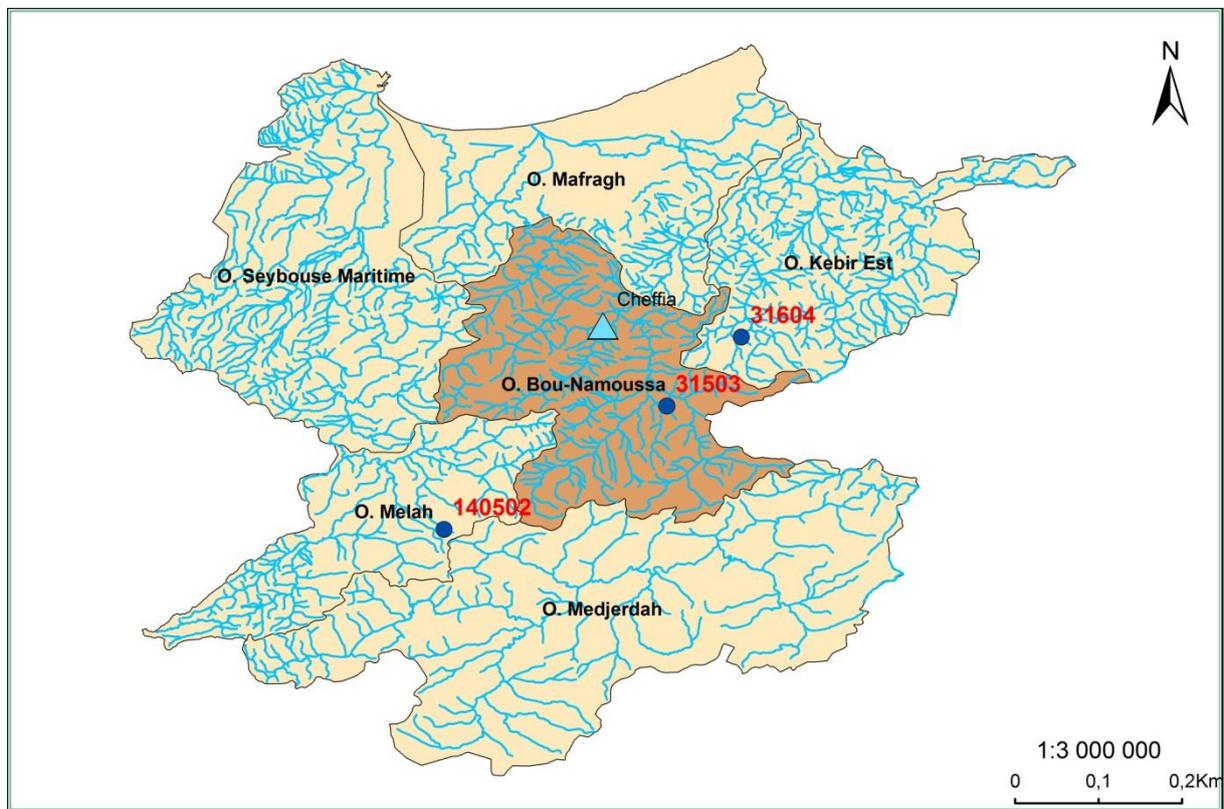


Figure II-1 : Présentation de la zone d'étude

II.4.2. Relief du bassin versant

L'Altitude moyenne est de 340 m, dans l'ensemble, l'altitude ne dépasse pas les 1000 m, sauf en quelques points de la chaîne des monts de la Medjerdah (Djbel M'cid 1406 m). Entre les chaînons orientaux qui se terminent sur la côte et ceux de l'Ouest qui bordent la vallée de la Seybouse, s'étend la vaste dépression d'Annaba, entre Annaba et la Calle. Cette dépression est parsemée de marécages : marais M'Krada, Lac des oiseaux, Lac Oubeira.

II.4.3. Géologie du Bassin Versant

Les dépressions (cuvette de la Cheffia, cuvette de Lamy...) ont un substratum constitué de schistes argileux et marneux, du Sénonien et de l'Eocène inférieur. Les massifs montagneux quant à eux sont essentiellement constitués d'alternances d'argiles et de grès. Les alluvions occupent d'assez grandes surfaces dans les cuvettes.

II.4.4. Couverture végétale

C'est l'une des rares régions d'Afrique du Nord où se reproduisent biches et cerfs. Les vallées sont les terrains de culture. La couverture végétale du bassin versant de la Cheffia (575 Km²) a une couverture végétale dense et constituée par la forêt arbustière en majorité.

II.4.5. Neige

La neige fait son apparition presque chaque année sur le mont de Medjerdah mais il est rare que la durée excède une semaine. La neige n'a donc aucune conséquence sur le régime des Oueds du bassin.

II.5. Régime des apports de la Bou-Namoussa au barrage de la Cheffia

II.5.1. Description de l'Oued

La Bounamoussa est la réunion de deux Oueds principaux :

- ✓ L'Oued Kebir qui prend sa source au sommet du Koudiat Ben Ahmed (1229 m d'Altitude) ;
- ✓ L'Oued Bouhadjar qui rejoint le Kebir à la hauteur du village Lamy. Le Bouhadjar, issu de Fedj-El-Ahmed à 1140 m d'altitude, draine un bassin versant de 250 Km².

Au confluent avec le Bouhadjar, le Kebir draine un bassin versant de 420 Km² constitué de zones montagneuses de la Medjerdah. En aval de la plaine de la Cheffia, l'Oued Kebir devient : l'Oued Bounamoussa. En aval du site du barrage, jusqu'à la plaine de

Asfour, la pente de l'Oued est relativement élevée, 8% en moyenne. Les principaux affluents sont :

- ✓ L'Oued Soudan B.V : 25 Km²
- ✓ L'Oued Gerriah B.V : 120 Km²
- ✓ L'Oued Chabel-El-Arag B.V : 50 Km².

II.5.2. Régimes de l'Oued

Le régime saisonnier des écoulements de la Bou-Namoussa au barrage de la Cheffia comprend deux périodes :

- ✓ Une période d'étiage allant de Juin à Septembre ;
- ✓ Une période de crues et de débits abondant allant d'Octobre à Mai-Juin.

D'après la figure ci-dessous, le tarissement commence à la fin de la saison des grandes pluies, à savoir entre la fin Mai et début Juin : l'Oued est à sec en général pendant les mois d'Août-Septembre. Les écoulements des cinq mois de Juin à Octobre sont peu importants en volumes. En Octobre, l'Oued commence à nouveau à débiter et les débits augmentent régulièrement jusqu'au mois de Décembre, époque à laquelle le sol de couverture est saturé. Les apports de Janvier, Février et Mars sont les plus importants et représentent environ 2/3 des apports annuels.

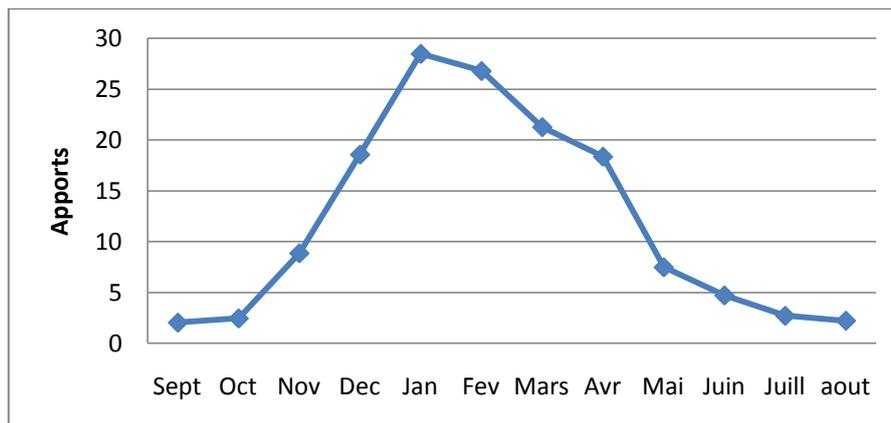


Figure n°II- 2 : Moyennes mensuelles inter annuelles des apports au barrage enMm³.

II.5.3. Fréquence des crues

Les fréquences des crues instantanées pour la Bounamoussa au barrage de la Cheffia sont représentées dans le tableau ci-dessous:

Tableau n°II-3 : Représentation des valeurs des crues.

Période de retour	Débit de pointe	Apport de 24 heures
Crue décennale	800 m^3/s	31 Hm^3
Crue centennale	1500 m^3/s	56 Hm^3
Crue millénale	3000 m^3/s	/

La crue de 2.000 m^3/s est la valeur adoptée pour le calcul des ouvrages d'évacuation ; pour une crue supérieure à 2.000 m^3/s , les débits excédentaires seront évacués par le déversoir de la digue du col d'El Karmat.

II.6. Hydrologie du site

II.6.1. Pluies

La répartition des pluies dans l'année est la même pour l'ensemble des stations et est caractérisée par une saison pluvieuse allant de Septembre à Mai et une saison sèche de Juin à Août.

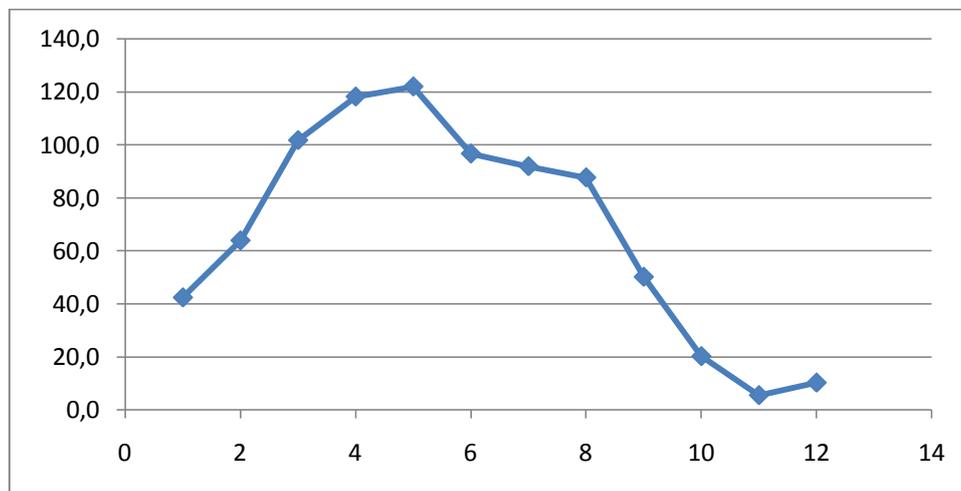


Figure n° II-3 : Moyennes mensuelles inter annuelles des pluies en mm

Pour neuf stations de la région, la moyenne annuelle varie entre 650 mm et 1600 mm de la zone la moins arrosée à la zone la plus arrosée. Les mois les plus secs sont les mois de Juin, Juillet et Août ; et les mois les plus arrosés sont : Décembre, Janvier, et Février.

II.6.2 Evaporation

L'évaporation observée à l'aide d'un bac Colorado à la station de jaugeage de la Cheffia sur l'Oued Bounamoussa de 1947 à 1954 a donné les moyennes mensuelles suivantes (en mm):

Tableau II-4 : Evapotranspiration en *mm* par mois.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout
ETP (mm)	142.0	106.2	68.7	54.0	53.0	59.9	88.3	108.5	142.5	169.9	205.1	192.9

Pour connaître l'évaporation du barrage, on emploie le coefficient de réduction de 0.78 correspondant au type de Colorado enterré. L'évaporation annuelle moyenne au barrage de la Cheffia est de : 1.055 mm, et en terme de volumes, nous avons : 8 millions de m^3 .

II.6.3 Transport Solide

On admet que 1 m^3 de vase dans le barrage pèse 1.6 tonne dont 1 tonne de matières solides et 0,6 tonnes d'eau. Entre 1947 et 1954, nous avons une moyenne annuelle des dépôts solides de 199.822 tonnes par an, ce qui correspondait à un envasement annuel de 199.822 m^3 /an.

Actuellement, il est passé à 340.000 tonnes par an, les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II-5 : Résumé des caractéristiques du barrage de la Cheffia.

Surface du bassin versant	575	Km ²
Débit annuel moyen	140	hm ³
Crue décennale	800	m ³ /s
Crue centennale	1500	m ³ /s
Crue millénale	3000	m ³ /s
Evaporation annuelle moyenne	8	hm ³
Pluie moyenne annuelle	900	mm
Envasement moyen annuel initial	199.822	tonnes
Capacité initiale à la cote R.N	171.992	hm ³ Soit 165.00 m (Levé 1965)
Surface initiale de la retenue à la R.N	987	ha
Capacité actuelle à la cote R.N	158.827	hm ³ Soit 165.00 m : (levé 2004)
Surface actuelle de la retenue à la R.N	1002,7	ha
Envasement moyen annuel actuel	340.000	tonnes

II.7. Alimentation en eau de la Ville d'Annaba

La ville d'Annaba était alimentée (avant la construction du barrage) par les forages de Blandan et de Salines. Blandan fournissait 7 à 8 hm³ d'eau de bonne qualité à Annaba et à certaines communes situées à proximité de la conduite. Les Salines fournissaient 6 hm³ d'eau

onéreuse et de mauvaise qualité car salée. Les conduites de Blandan et de Salines sont en très mauvais état.

De nos jours, la ville d'Annaba est alimentée par des ressources souterraines, au nombre de cinq (Nappe des Salines, nappe dunaire et alluviale de Bouteldja, nappe de Guerbes et enfin celle du Pont Bouchet destinée à l'alimentation en eau de la ville d'Annaba). Ajouté à cela les ressources superficielles des barrages de la Cheffia, de Mexa, et de Bougous.

Actuellement l'alimentation en eau de la wilaya d'Annaba est assurée par deux systèmes de transfert différents. Le premier démarre du barrage de la Cheffia par une conduite en béton armé de DN1500 mm d'une longueur de 23 km, allant jusqu'à la station de pompage O.P.I. (Zerizer). De la station de pompage commence une conduite en béton précontraint de DN 930 mm d'une longueur de 22 km, amenant l'eau jusqu'à la station de traitement de Chaiba.

Le deuxième système de transfert quant à lui démarre du barrage de Mexa et des nappes Bouteldja, des Salines et du Pont Bouchet. La station de pompage Bouteldja refoule les eaux des nappes Bouteldja dans un réservoir- tampon d'une capacité de 2000 m³ ; ces eaux sont en suite amenées par une conduite gravitaire en acier de DN=1066 mm d'une longueur de 22 km jusqu'à la station de pompage des Salines. L'eau est en suite refoulée à travers une conduite en acier de DN=1066 mm et de longueur : 9,4 km jusqu'à la station de traitement d'eau de Chaiba.

II.8. Industrie

Le complexe d'El Hadjar s'étend sur une superficie de 800 ha ; il est alimenté gravitairement par le barrage de la Cheffia. Les besoins de la sidérurgie ont été évalués à 5 hm³ vers 1972, et ces derniers ont augmenté jusqu'à atteindre les 12 hm³ par an (ce qui donne une moyenne de 1 hm³ par mois). Toutefois, il est important de signaler que cette consommation reste faible grâce aux efforts techniques entrepris pour diminuer la consommation en eau des installations. Ils sont même prévus de diminuer la consommation en eau, en recyclant l'eau de la station d'épuration. Aussi, aucune extension du complexe n'est prévue durant les 5 prochaines années, ce qui garanti une constance au niveau de la demande.

Toutefois, une priorité a été donnée pour l'industrie d'El Hadjar en raison des multiples procès de la coquerie, utilisant la ressource en eau. L'arrêt des procédés

compromettrait la production, ainsi que les installations, ce qui engendrerait de graves répercussions financières et sociales.

II.9. Périmètre de la Bounamoussa

Le périmètre de la Bou-Namoussa, situé dans la wilaya d'El Taraf couvre une superficie totale brute de 16 500 ha, dont une superficie nette irrigable de 14 800 ha répartis comme suit :

Tableau n°II-6:Répartition des superficies nettes irrigables du périmètre de la Bounamoussa.

Secteurs	Superficies (ha)
Asfour	920
Bouzeitoune BZ	230
Bounamoussa Ouest BNO	1990
Bounamoussa Est BNE	900
Boualallah Nord BAN	707
Zerizer/Besbes Z.B	1713
Boukharina Ouest BK.O	2287
Seybouse Nord SN	2256
Seybouse Sud SS	2475
Total	16351

Le périmètre qui occupe la partie Sud-Est de la plaine d'Annaba est rattaché administrativement aux Wilayas d'Annaba (20%), d'El Taref (80%) et aux daïras de : El Hadjar, Besbes, Drean, Ben M'hidi. Il s'étend sur une longueur de 12 km de part et d'autre de la route reliant Bouhadjar à Annaba. Les limites géographiques du périmètre sont :

- ✓ Au Nord : la ville de Ben M'hidi et la route Annaba – El Kala ;
- ✓ Au Sud : les villages de Asfour et Zerizer ;
- ✓ A l'Ouest : la route de Annaba – Tebessa ;
- ✓ A l'Est : le village de Sidi Kassi et les montagnes de la Medjerda.

Malheureusement, un constat déplorable est fait concernant les superficies irriguées qui sont en constante diminution : ceci pouvant s'expliquer par l'augmentation des superficies de céréales (elles atteignent actuellement 70%). En outre, les superficies de la tomate industrielle sont passées de 2000 ha à 350 ha en raison de la fermeture des conserveries, ajouté à ces deux raisons le prix exorbitant de l'eau du barrage qui atteint 2.5 Da le m^3 . Toutefois, les objectifs suivants ont été fixés :

- ✓ Accroître la superficie irriguée de 2000 ha à 8000 ha (en sachant que la superficie irrigable est de 13000 ha) ;
- ✓ Revenir à la vocation initiale de la région en terme de :
 - *Culture* : Tomate industrielle, fourrages (à condition d'avoir une irrigation de complément), et arboriculture. En effet, avant 1987, il y avait trois zones bien distinctes selon leur drainage. Il faudrait donc optimiser le plan cultural en fonction de ces trois zones.
 - *Découpage* : Actuellement, le découpage est fait en petites surfaces, et la pression de service d'aspersion est insuffisante. Ils veulent donc revenir à la notion d'îlots, avec une borne sur 20 ha.

Le calcul des besoins du périmètre se fait par la détermination d'un volume nécessaire pour chaque culture en additionnant les pertes, et ce, après recensement des superficies.

II.10. Données prises en compte dans l'étude

L'étude et la critique des données existantes permettent de combler les vides, détecter les valeurs douteuses, et déterminer si l'échantillon contient des valeurs indépendantes et homogènes, ou non. Les données recueillies nous ont été gracieusement fournies par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydriques) ainsi que par l'ANBT (Agence Nationale des Barrages et Transferts). Les paramètres pris en compte sont les suivants :

✓ Les pluies

Les pluies qui nous ont été fournies sont des pluies issues de quatre différentes stations, dont une située à l'intérieur du barrage de la Cheffia. Les relevés commencent à partir de Septembre 1970 et s'étendent jusqu'en Août 2008. Le tableau suivant contient les caractéristiques des stations pluviométriques considérées, avec leurs noms, ainsi que leurs coordonnées.

Tableau n° II-7 : Caractéristiques des stations du sous-bassin de la Cheffia.

	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
Code	031604	/	031503	140502
Noms	AIN KERMA	Pluviomètre barrage	BOU HADJAR	MECHROHA
X	991,6	/	984,2	961,15
Y	379,35	/	369,75	351,55
Z	280	/	300	750

✓ Les ETP

Les ETP sont disponibles depuis Septembre 1980 jusqu'en Août 2008, mais comme ces valeurs sont cycliques, le fait que la durée soit plus courte n'influence pas beaucoup les modèles. Concernant le barrage, les données recueillies à un pas de temps mensuel, depuis 1970 jusqu'en 2010 (40ans), ce qui constitue en soi une base de données très intéressante du fait de sa longueur et de sa mise à jour

Tableau n° II.8 : Données du barrage de la Cheffia.

Nom	Description
App. (Hm^3)	volume d'eau mensuel entré dans le barrage
AEP. (Hm^3)	Volume alloué à l'Alimentation en Eau Potable
Irrig. (Hm^3)	Volume alloué à l'Irrigation
AEI (Hm^3)	Volume alloué à l'Industrie
Cons. Tot. (Hm^3)	Consommation Totale : AEP, Irrigation et industrie
Vidange (Hm^3)	Volume vidangé par mois
Evap. (Hm^3)	Volume d'eau évaporé par mois
Cote Deb. (m)	Cote d'eau dans le barrage en début de mois
Vol. Deb. (Hm^3)	Volume d'eau dans le barrage en début de mois
Cote Fin. (m)	Cote d'eau dans le barrage à la fin du mois
Vol. Fin. (Hm^3)	Volume d'eau dans le barrage à la fin du mois
Taux. (%)	Taux de remplissage : Volume dans le barrage divisé par sa capacité

II.11. Problèmes de données

Les types de problèmes le plus souvent rencontrés lors du traitement des données en hydrologie sont :

- ✓ *Le manque de données* : lorsque les stations de mesures sont inexistantes ;
- ✓ *Non-continuité des données* : manque d'enregistrements dans une station ;
- ✓ *La mauvaise qualité des données* : qui peut dépendre de deux causes :
 - *Données inconsistantes* : lorsqu'elles sont entachées d'une erreur systématiques dues à des instruments de mauvaise qualité ou non calibrés.
 - *Données non homogènes* : lorsqu'il se produit à un moment donné, un changement de l'emplacement de l'appareil qui affecte la mesure (déplacement de la station de mesure ou changement d'appareil) (Liamas, 1985)

La première des choses à faire lorsque nous nous retrouvons face à un échantillon c'est de :

- ✓ Comblent les lacunes
- ✓ Détecter et corriger les valeurs douteuses

- ✓ Critiquer des données

II.11.1. Comblement des lacunes

Cette étape peut se faire de différentes manières ; nous pouvons citer :

- ✓ Le remplacement de la valeur manquante par celle de la station la plus proche ;
- ✓ Le remplacement de la valeur manquante par la moyenne des stations voisines ;
- ✓ Le remplacement de la valeur manquante par une moyenne pondérée par la tendance annuelle des stations pluviométriques par exemple, soit :
 - Le remplacement de la valeur manquante par la moyenne inter-annuelle de la série considérée ;
 - Les méthodes basées sur l'analyse de régressions et de corrélations ;
 - Méthode basée sur la simulation.

Dans notre cas, les données qui nous ont été fournies ne présentaient aucun manque, toutefois, nous avons choisi d'effectuer un test afin de détecter la présence ou non de valeurs aberrantes.

II.11.2. Détection des valeurs douteuses (Test de Grubbs et Beck)

Ce test permet de détecter les points singuliers d'une série de données en calculant les statistiques suivantes :

$$X_h = \exp(\bar{x} + K_n * s_x)$$

$$X_l = \exp(\bar{x} - K_n * s_x)$$

\bar{x} et s_x : Sont respectivement, la moyenne et l'écart type des logarithmes naturels des éléments constituant l'échantillon.

K_n : Valeur statistique du test de Grubbs et Beck, tabulée pour différentes tailles d'échantillons et de niveaux de signification.

Au niveau de risque de 10%, l'approximation polynomiale suivante a été proposée par Bobée (1991) :

$$K_n = 3.62201 + 6.28446 * n^{1/4} - 2.49835 * n^{1/2} + 0.491436 * n^{3/4} - 0.03791 * n$$

n : Taille de l'échantillon.

En appliquant ce test, tous les points de l'échantillon supérieurs à X_h ou inférieurs à X_l seront considérés comme points singuliers. En appliquant cette méthode sur les données que nous avons, avec les paramètres considérés, nous aurons les résultats suivants :

Tableau n° II-9 : Résultats du Test de Grubbs et Beck

Paramètre	Xl	Xh
Débits (m ³ /s)	1.1076e-009	1.3343e+010
Pluie station 1(mm)	2.6239e-007	1.9814e+009
Pluie station 2 (mm)	1.6338e-006	5.8206e+008
Pluie station 3(mm)	6.4532e-008	5.6875e+009
Pluie station 4 (mm)	7.8257e-008	1.5307e+010
ETP(mm)	0.6081	1.7641e+004

Les résultats du test montrent que des variables nulles sont des variables singulières, alors qu'en réalité, les pluies mensuelles ainsi que les apports mensuels peuvent être nuls en Août. Concernant l'ETP, aucune valeur mensuelle ne se trouve en dessous de la limite fixée.

II.11.3. Critique des données

A présent, il est indispensable de tester l'indépendance ainsi que l'homogénéité des valeurs, et ce, par les deux tests suivants :

II.11.3.1. Test d'homogénéité (Wilcoxon-Mann-Withney)

Les échantillons sont dits homogènes, s'ils sont caractérisés par une même loi de probabilité et par les mêmes paramètres, les données recueillies sont alors considérées comme extraites d'une même population. En hydrologie, cela veut dire que les conditions qui ont prévalu lors de la collecte des données, ou de l'avènement du phénomène considéré (pluie, évaporation, etc.) n'ont pas changé pendant toute la durée de la collecte, ou en d'autres termes qu'il n'y a pas eu un phénomène extraordinaire qui aurait pu modifier les données hydrologiques considérées (changement de site de la station de mesure, construction d'un barrage à l'amont, urbanisation etc...).

La méthode que nous avons retenu pour faire ce test est celle de : Wilcoxon-Mann-Withney. Il permet de voir si une série statistique est homogène, c'est à dire si les éléments qui la constituent proviennent de la même population. La méthode se déroule comme suit :

1. L'échantillon est subdivisé en deux sous-ensembles de tailles respectives p et q avec $p \geq q$.

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_q$$

$$y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_p$$

La taille de l'échantillon original est $n=p+q$.

2. Classement des valeurs par ordre croissant de 1 à n et nous notons les rangs $R(x_i)$ des éléments du premier sous-ensemble et $R(y_i)$ des éléments du second sous-ensemble dans l'échantillon original.
3. Définition des deux statistiques K et F comme suit :

$$K=L-\frac{q(q+1)}{2} \text{ et } F=pq-K$$

$$L=\sum_{i=1}^q R(x_i)$$

L : Somme des rangs des éléments de l'échantillon 1 dans l'échantillon original.

K : Somme des nombres de dépassements de chaque élément du second échantillon par ceux du premier.

F : Somme des ^{nombre} de dépassements des éléments du premier échantillon par ceux du second.

Lorsque n, p et q sont suffisamment grand, K et F suivent une distribution normale :

- de Moyenne $\bar{K}=\bar{F}=\frac{pq}{2}$,
- et d'écart type $s_K=s_F=\left(\frac{pq(p+q+1)}{12}\right)^{1/2}$

Tester si oui, ou non les échantillons proviennent de la même population au niveau de signification α en comparant la grandeur statistique :

$$T=\left|\frac{K-\bar{K}}{s_K}\right|$$

Avec la variable normale centrée réduite U de probabilité de dépassement $\frac{\alpha}{2}$. Si $T \leq U_{\alpha/2}$ alors les deux échantillons proviennent de la même population, dans le cas contraire l'échantillon étudié est considéré comme non homogène ($T \geq U_{\alpha/2}$).

Tableau n° II-10 : Résultats du Wilcoxon-Mann-Withney

Paramètre	T
Débits (m ³ /s)	48.1
Pluie station 1(mm)	46.9
Pluie station 2 (mm)	49.2
Pluie station 3(mm)	46.5
Pluie station 4 (mm)	44.7
ETP(mm)	47.3

Les résultats de ce test montrent que les observations de tous les paramètres étudiés sont non homogènes.

II.11.3.2 Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz)

Les données recueillies doivent constituer une série d'observations indépendantes. L'indépendance signifie l'absence d'auto-corrélations : c'est-à-dire qu'il n'y a aucun lien entre les observations. Pour vérifier l'indépendance des données, nous avons opté pour l'utilisation du test de Wald-Wolfowitz à toutes les séries recueillies, sur des pas de temps mensuels.

A la suite des travaux d'Anderson (Dagnelie, 1998), Wald et Wolfowitz ont développé un test non paramétrique du coefficient d'auto-corrélation, celui-ci est basé sur le critère qu'aucune observation appartenant à l'échantillon ne devrait influencer l'observation suivante. La statistique du test est calculée comme suit :

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} + x_n x_1$$

Pour n suffisamment grand, cette statistique suit une distribution normale de moyenne et de variance :

$$E[R] = \frac{(S_1^2 - S_2)}{n-1}$$

$$Var[R] = \frac{(S_2^2 - S_4)}{n-1} + \frac{(S_1^4 - 4S_1^2 S_2 + 4S_1 S_3 + S_2^2 - 2S_4)}{(n-1)(n-2)} - \{E[R]\}^2$$

$$S_k = \sum_{i=1}^n x_i^k$$

S_k : Moment d'ordre k de l'échantillon.

La valeur statistique $T = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{Var(R)}}$ suit une distribution normale centrée réduite $N(0,1)$, et est utilisée pour tester à un niveau de signification, l'hypothèse d'indépendance en comparant la valeur absolue de T avec la valeur normale centrée réduite $U_{\alpha/2}$ correspondant à la probabilité de dépassement de $\alpha/2$. Si $|T|$ est inférieure à $U_{\alpha/2}$ l'hypothèse d'indépendance est vérifiée, celle-ci est rejetée dans le cas contraire.

Les résultats du test sont négatifs : les paramètres considérés sont dépendants. Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau n°II-11 : Résultats du test de Wald-Wolfowitz

Paramètres	T
Débits (m^3 /s)	9.5319
Pluie station 1(mm)	7.0105
Pluie station 2 (mm)	7.2934
Pluie station 3(mm)	7.2204
Pluie station 4 (mm)	10.1228
ETP (mm)	15.0558

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA GESTION EXISTANTE DU BARRAGE

III.1. Introduction

Afin de comprendre la gestion ainsi que le fonctionnement passé et présent du barrage de la Cheffia, nous allons présenter et critiquer la totalité des paramètres recueillis. En effet, l'analyse des données collectées au niveau du barrage est primordiale avant de se lancer dans la mise en place de procédures permettant d'exercer un meilleur contrôle sur les processus productifs et l'organisation d'une réactivité satisfaisante en cas de perturbation importante (forte variation de la demande, ressources momentanément insuffisantes, etc.).

Cette analyse implique une bonne connaissance des paramètres que l'on cherche à maîtriser. C'est à ce niveau qu'intervient l'outil statistique qui permet au gestionnaire de structurer le gisement d'informations disponibles et d'en faire le meilleur usage afin de rationaliser sa prise de décision.

Pour clore ce chapitre, nous tenterons de gérer le barrage, en se substituant au gestionnaire. Cette gestion sera considérée comme rationnelle, et proche du parfait, car connaissant les apports futurs, et pouvant revenir sur nos décisions, et éviter ainsi toute défaillance. Nous comparerons cette simulation à l'historique sur la base du calcul de Probabilités, et du taux de satisfaction. Cette dernière étape nous permettra de confirmer si la ressource en eau est belle et bien disponible, et si les défaillances déjà vécues ne furent qu'une cause de mauvaise gestion.

III.2. Analyse des apports

L'analyse des apports annuels du barrage de la Cheffia va nous renseigner sur la qualité de la série historique, et ce en comparant les apports annuels à leur moyenne : si l'apport annuel est supérieur à la moyenne, l'année sera humide, s'il est inférieur, elle sera alors considérée comme sèche. Les apports annuels sont représentés dans la figure suivante :

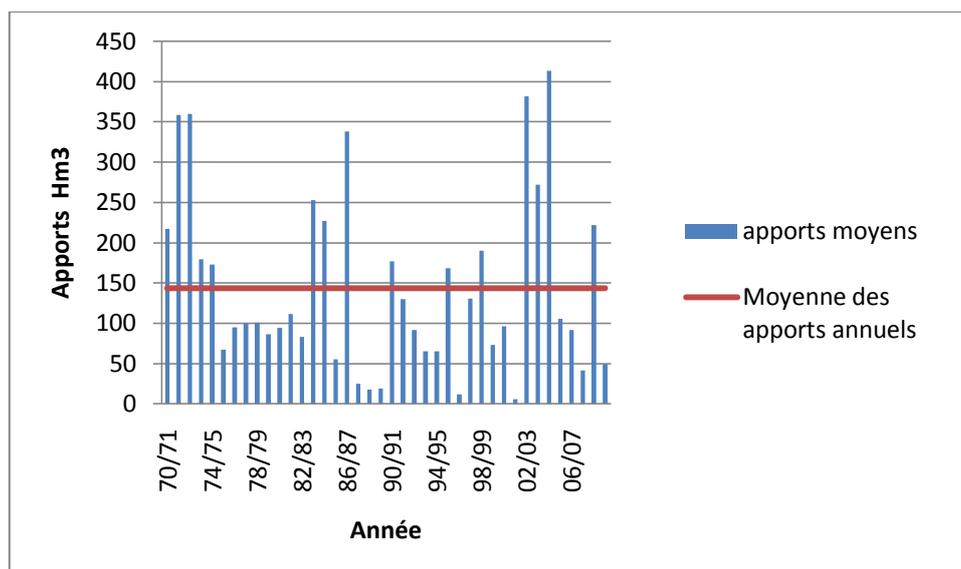


Figure n° III-1: Représentation des apports annuels historiques.

En analysant le graphe ci-dessus, nous remarquons une grande variation des apports annuels ; ainsi, les apports peuvent passer d'une valeur élevée à une valeur relativement faible d'une année à l'autre, comme nous l'avons constaté entre les années 84/85 et 85/86. Les exemples de ce genre au cours de la période considérée sont nombreux.

Nous constatons une baisse vertigineuse des apports entre 1987 et 1990. Les années 1996/1997, et 2001/2002 ont connu un très faible apport, qui n'a pas dépassé les 25 Mm³. On notera que les apports sont bien souvent inférieurs au débit moyen annuel de l'oud Bounamoussa, qui est de 140 Mm³. Mais il y a des années où l'apport excède cette valeur ; l'année 2004/2005 en est un bon exemple : c'est l'année où l'apport annuel est maximum, avec une valeur dépassant les 400Mm³.

Ainsi, en prenant en compte la moyenne des apports annuels, nous remarquons que le nombre d'années humides s'élève à 15, alors que le nombre d'années sèches est de 25.

Le groupement consiste à synthétiser toutes les valeurs situées dans un intervalle par une valeur unique appelée : centre de classe et à laquelle on attribue une fréquence égale à la somme des fréquences appartenant à l'intervalle.

Le problème technique d'une telle procédure consiste à faire un choix judicieux des classes. Ce dernier peut se faire arbitrairement, ou en employant des formules empiriques :

$$Nc=1+3,3 \times \log_{10}(N)$$

Ou alors :

$$Nc=1+\frac{1}{3} \times \ln(N)$$

Où : Nc : Nombre de classes

N : Taille de l'échantillon

Dans notre cas, nous avons choisi de travailler avec des tranches de 50Mm³. Les résultats sont les suivants :

Tableau n° III-1 : Caractéristiques de l'analyse des apports par groupement de variables.

N° classe	Centre Classe	Ni(effectif)	Fi(fréquence)	F(fréquence cumulée)
1	25	7	0.175	0.175
2	75	12	0.3	0.475
3	125	6	0.15	0.625
4	175	5	0.125	0.750
5	225	3	0.075	0.825
6	275	2	0.05	0.875
7	325	1	0.025	0.900
8	375	3	0.075	0.975
9	425	1	0.025	1.000

Nous remarquons que la probabilité d'avoir des apports situés entre 50 et 100 Mm³ est la plus importante, et est égale à 30%, suivie de la première tranche avec une probabilité de 17.5%. Les probabilités d'avoir des apports entre 200 et 450 sont faibles. Ces valeurs sont en réalité considérées comme maximales.

III.3. Analyse des vidanges

Le graphe ci-dessous représente les vidanges annuelles depuis 1970 jusqu'à 2010 :

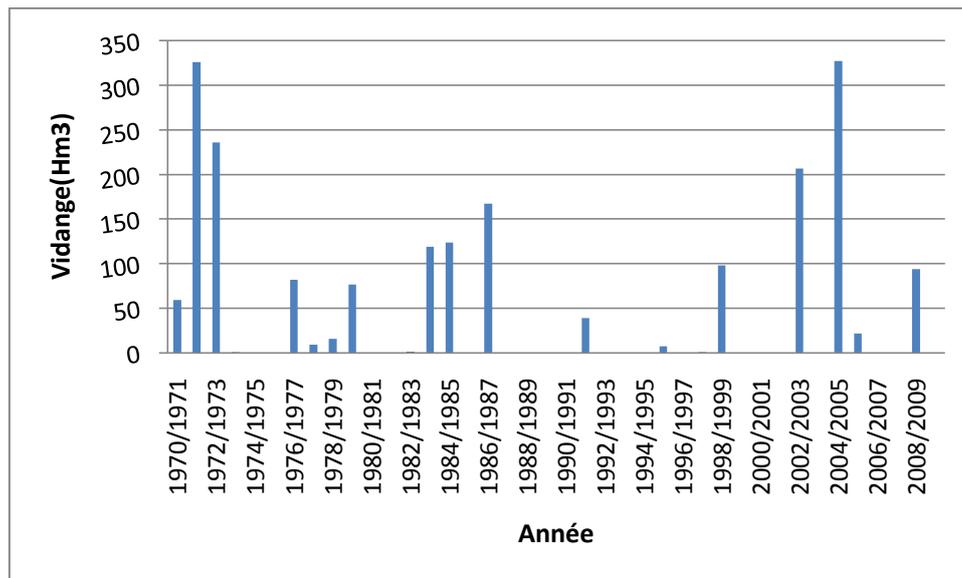


Figure N° III-2 : Analyse des vidanges annuelles historiques.

En analysant ce graphe, nous remarquons que les volumes vidangés sont très importants en 1971/1972 et 2004/2005 atteignant les 325 Mm³. Ceci est tout à fait logique étant donné les apports importants durant ces deux années. Ainsi, au cours de cette période, les vidanges, si elles existent, sont généralement importantes, et dépassent les 50 Mm³.

III.4. Analyse des dotations annuelles

Le barrage de la Cheffia est destiné à l'alimentation en eau de trois secteurs : L'AEP, qui détient le monopole avec 53.47% de la dotation totale, suivie de l'irrigation avec 31.67% et enfin l'industrie, avec un pourcentage égal à 14.89. Dans ce qui suit, une analyse de la variation des apports pour les trois secteurs de 1970 jusqu'en 2010.

III.4.1. Dotation pour l'AEP

La figure suivante montre la variation de l'allocation en eau potable, durant les années s'étalant de 1970 à 2010 :

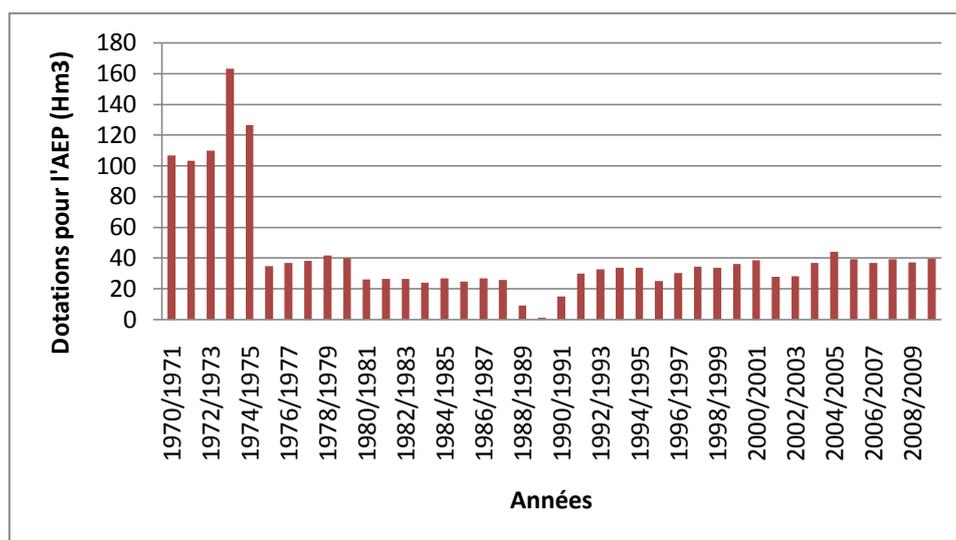


Figure n° III-3 : Représentation des allocations annuelles historiques pour l'AEP.

La première chose que l'on remarque est la quantité très importante d'eau allouée à l'AEP durant les cinq premières années : en effet, elles dépassent toutes les 100 Mm^3 , alors que la dotation ne devrait pas excéder les 40 Mm^3 . Un pic de 160 Hm^3 a d'ailleurs été atteint en 1973/1974.

A partir de Septembre 1978, nous remarquons que la variation des dotations fluctue généralement entre 20 et 40 Mm^3 , exception faite pour les années entre 1989 et 1991 où la dotation était extrêmement faible avec une valeur exceptionnelle pour l'année 89/90 atteignant à peine 1.24 Mm^3 . Nous remarquons aussi qu'entre 1981 et 1991, les volumes alloués à l'AEP restent en deçà de la limite requise, alors que les apports ont enregistré de nettes augmentations entre 83/84, 84 /85 et en 86/87, dépassant les 225 Mm^3 .

III.4.2. Dotation pour l'irrigation

La figure suivante montre l'évolution de l'allocation pour l'irrigation de l'historique :

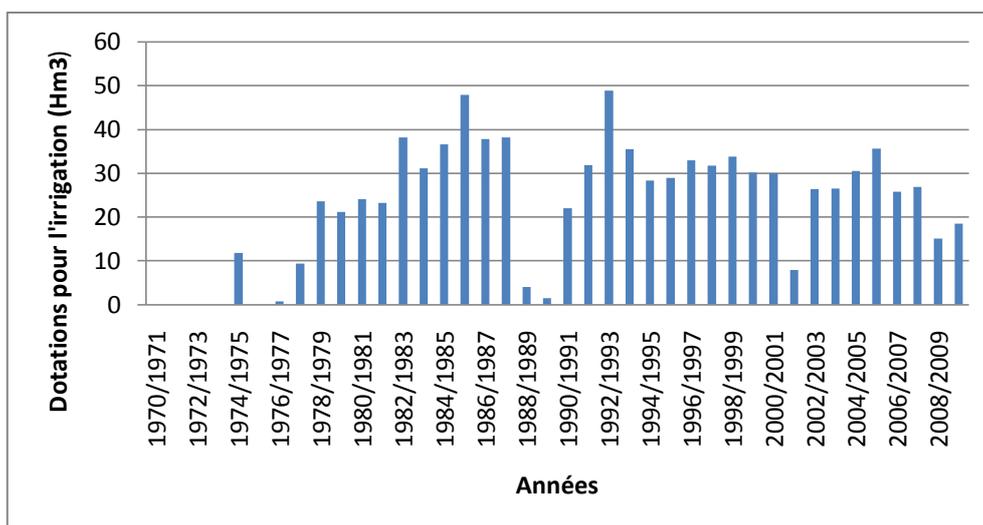


Figure n° III-4: Représentation des allocations annuelles historiques pour l'irrigation.

Nous remarquons d'après ce graphe que les années entre 1970 et 1977 n'ont connu aucune allocation pour l'irrigation, hormis l'année 1974/1975, où la dotation était à peine égale à 10 Mm³. Ceci est extrêmement étonnant étant donné que la dotation du secteur de l'AEP enregistrait une allocation bien supérieure à la demande. Pour le reste des années, nous constatons des fluctuations relativement importantes des allocations.

En outre, les années 1976/1977, 1988 à 1990 et 2001/2002 ont connu les plus faibles volumes alloués à ce secteur avec un minimum de 1.52 Mm³ en 1989/1990. En revanche, les maximums d'eau alloués ont été observés en 1985/1986 et 1992/1993 avec des volumes excédant les 47 Mm³. De plus, la dotation n'a jamais dépassé le volume requis de 60 Mm³ tout au long de l'historique puisque les valeurs n'atteignent même pas les 50 Mm³.

III.4.3. Dotation pour l'industrie

Les dotations annuelles pour le secteur de l'industrie sont représentées dans la figure suivante.

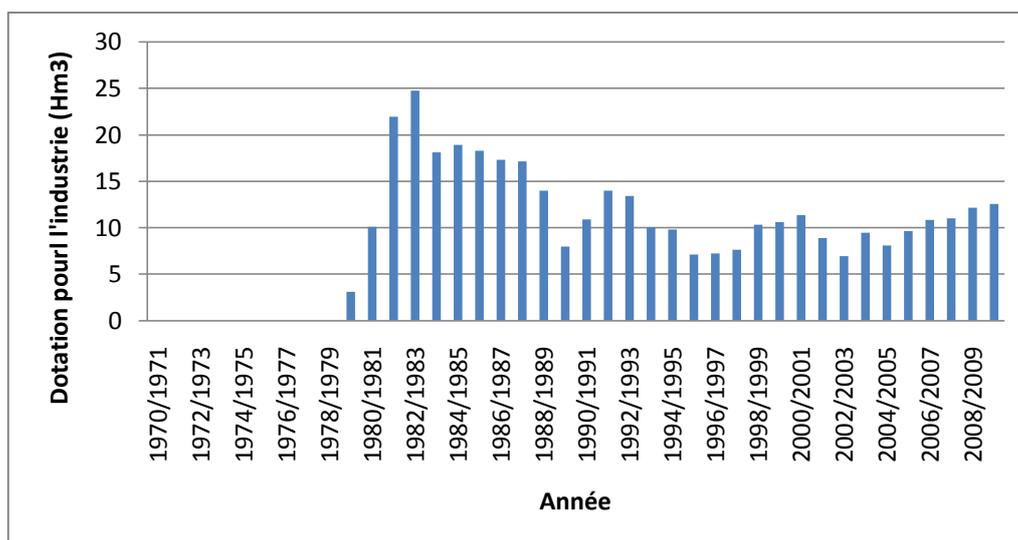


Figure n° III-5 : Représentation des allocations annuelles historiques pour l'AEI.

Le barrage a commencé à alimenter le secteur de l'industrie à partir de l'année 1979/1980. L'Année 1981/1982 a enregistré un volume maximal inégalable atteignant les 25 Mm³ par la suite. Ainsi, la dotation pour l'industrie varie entre 5 et 15 Mm³. On remarque aussi que durant la période de sécheresse de 89/90, le secteur de L'AEI n'a pas noté de baisse dans le volume alloué, ce qui prouve que la priorité à cette période là ne fut pas l'AEP mais bien l'industrie.

III.4.4. Consommation totale

La variation de la consommation en eau des trois secteurs confondus est donnée dans la figure ci-dessous :

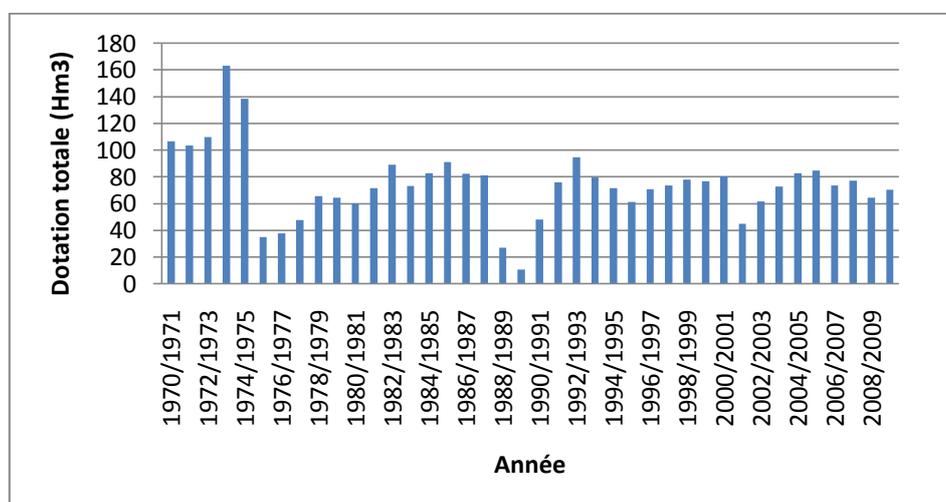


Figure n° III-6 : Représentation des allocations annuelles historique des trois secteurs.

L'analyse de la dotation totale pour les trois secteurs montre un maximum pour l'année 1973/1974 atteignant 160 Mm^3 , suivi, deux années après d'une baisse importante atteignant un volume à peu près égal à 40 Mm^3 . Un minimum de 11 Mm^3 est enregistré entre 1989/1990. L'année 2001/2002 enregistre aussi un faible volume d'eau consommé n'atteignant pas les 0 Mm^3 .

III.5. Analyse des dotations mensuelles

La variation mensuelle de la dotation pour l'AEP ainsi que pour l'industrie est très faible, comme le montrent les deux figures suivantes ;

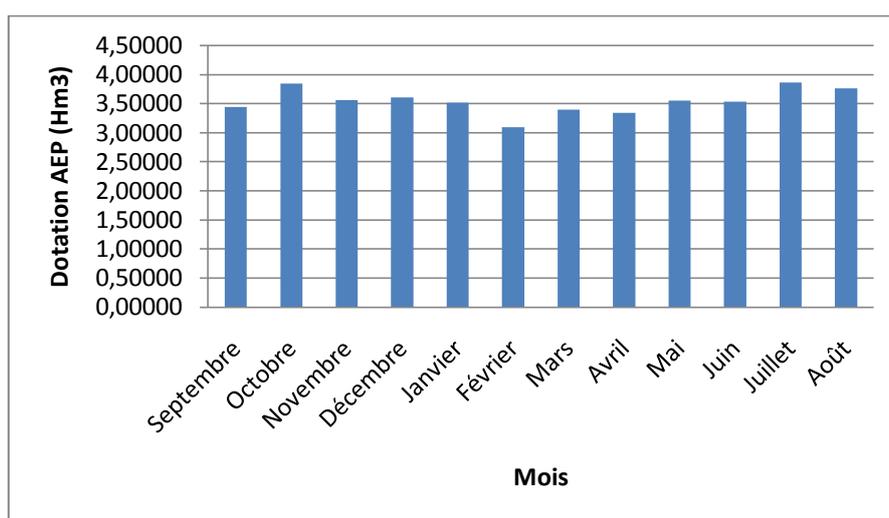


Figure n° III-7: Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'AEP.

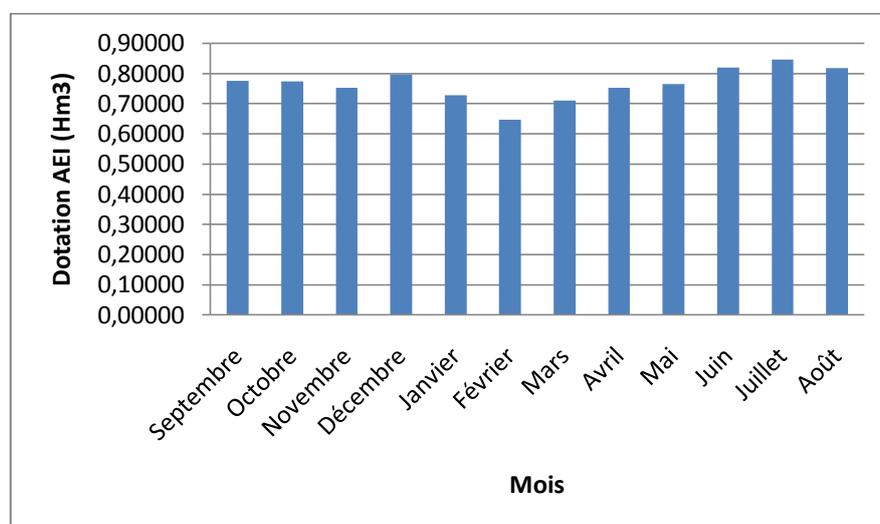


Figure n° III-8: Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'AEI.

Les dotations interannuelles pour ces deux secteurs sont maximales en saison sèche, et faiblissent durant les mois les plus humides (tels que le mois de Février). En revanche, on notera une grande différence de dotation mensuelle pour l'irrigation ; en effet, la campagne d'irrigation est effectuée entre Avril et Octobre, comme nous pouvons le constater dans la figure suivante.

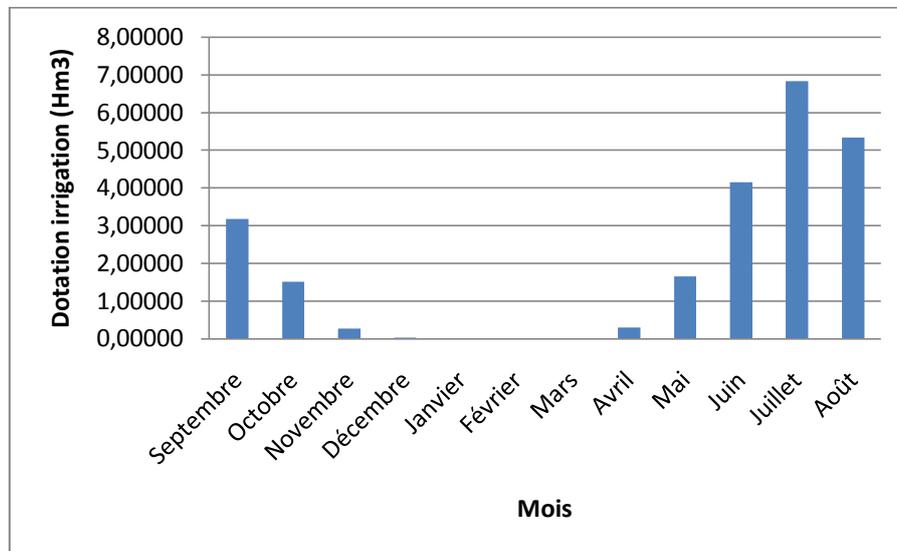


Figure n° III-9: Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'Irrigation.

III.6. Analyse des données par la méthode de l'ACP

L'analyse en composantes principale est une méthode statistique permettant une description essentiellement graphique de l'information contenue dans de grands tableaux de données. Elle est souvent considérée comme la méthode de base de l'analyse des données dont l'objectif est la détermination des fonctions des p variables ou facteurs qui serviront à visualiser les observations de façon simplifiée.

Les étapes de l'ACP peuvent se résumer comme suit :

- ✓ Calculer les paramètres statistiques (moyenne et écart-type) des variables ;
- ✓ Calculer la matrice des données centrées réduites;
- ✓ Calculer la matrice des corrélations de la matrice des données centrées réduites ;
- ✓ Diagonaliser la matrice de corrélation (recherche des vecteurs propres);
- ✓ Déterminer les valeurs propres de la matrice de corrélation, ainsi que leurs contributions ;
- ✓ Calculer la matrice des composantes principales ;

- ✓ Réduire la matrice des composantes principales ;
- ✓ Calculer la matrice des corrélations entre la matrice des composantes principales réduites, et la matrice des données centrées réduites ;
- ✓ Visualiser et interpréter les résultats graphiquement.

III.6.1 Application de l'ACP sur les paramètres du barrage

Une ACP a été appliquée sur les 14 paramètres du barrage, représentés dans le chapitre II (tableau n° II-2). En plus de l'analyse des données, le but de cette ACP est de déterminer la redondance pouvant exister entre les paramètres, afin d'en éliminer certains lors de l'élaboration de l'équation de continuité nous permettant d'établir une gestion manuelle. Le résultat graphique de la corrélation entre les deux premières composantes principales réduites est représenté dans le cercle ci-après :

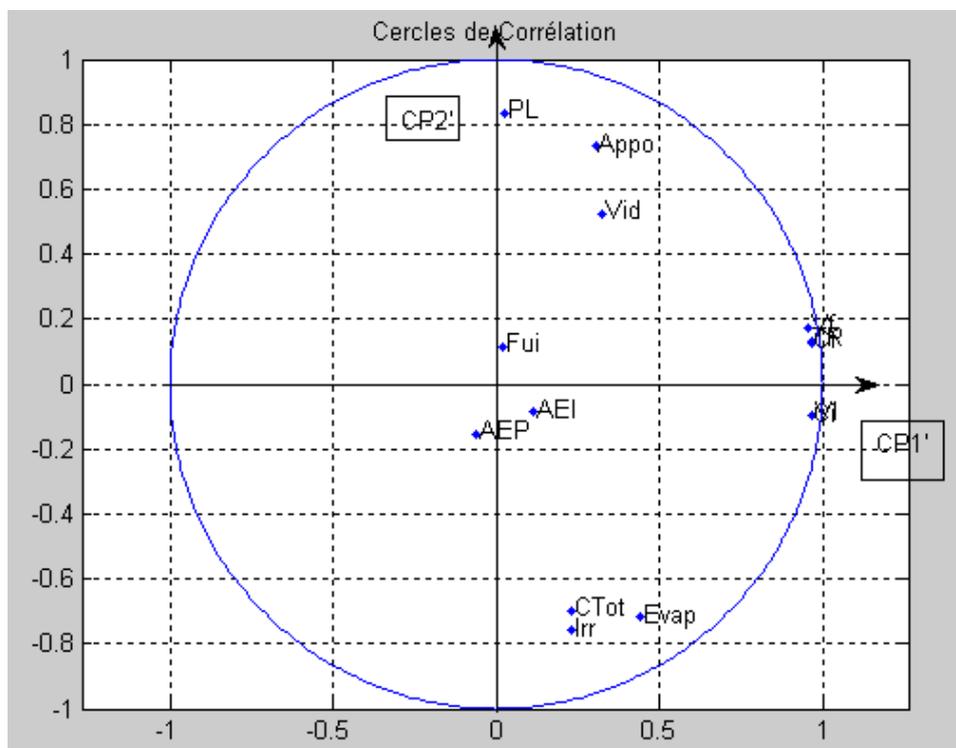


Figure n° III-10: Cercle de corrélation CP1' et CP2' des 14 paramètres de la gestion passée.

A travers le premier cercle de corrélation, nous remarquons la formation d'un groupe, corrélé à la première composante principale et comprenant : Les cotes, les volumes initiaux et finaux, et le taux de remplissage du barrage. Ce groupe représente la quantité d'eau dans le barrage, et l'explication de cette variable peut se faire par l'un des éléments de ce groupe.

La consommation totale, l'AEP et l'évaporation entrent dans la composition du même groupe. Ceci reste pour nous inexplicable étant donné que l'évaporation, qui est bien corrélée à l'ETP et qui représente la demande climatique devrait être corrélée à l'irrigation. Les pluies, les apports et la vidange forment aussi un groupe. Ce qui s'explique parfaitement par le fait qu'une averse génère un débit, et qu'un débit bien trop grand pourrait donner suite à des vidanges.

Les fuites, l'irrigation et l'AEI ont quant à eux formé un groupe se situant au centre du cercle, ce qui indique que ces paramètres ne sont corrélés ne sont corrélés avec aucun autre paramètre. Les caractéristiques de l'Analyse en Composantes Principales de la gestion passée sont représentées dans l'annexe I.

III.7. Critique de la gestion réelle ou historique

Dans ce travail, la critique de chaque gestion se fera en termes de probabilité d'apparition des dotations dans les intervalles représentés dans les tableaux n°III-3 et III-4, dont les bornes ont été choisies de manière aléatoire. Chaque intervalle représente une qualité de satisfaction : Bonne, moyenne et faible.

Tableau n° III-3 : Probabilités des allocations annuelles respectivement pour chaque secteur AEP, AEI, et Irrigation.

Bonne	Moyenne	Faible	Bonne	Moyenne	Faible	Bonne	Moyenne	Faible
P11	P12	P13	P21	P22	P23	P31	P32	P33
AEP>32	24<AEP<32	00<AEP<24	AEI>10	08<AEI<10	AEI<08	Irr>40	25<Irr<40	Irr<25

Tableau n° III-4 : Probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus.

Bonne	Moyenne	Faible
P1	P2	P3
Ctot>82	57<Ctot<82	AEI<57

Lorsque nous avons appliqué ce calcul de probabilités sur la gestion historique, nous avons obtenu les deux tableaux suivants :

Tableau n° III-5 : Probabilités des allocations annuelles totales, pour la gestion réelle.

Probabilités des Lâchers Totaux			Historique
Bonne	P1	>82	0.3077
Moyenne	P2	[57 82]	0.5128
Faible	P3	< 57	0.1795

Le tableau n°III-5 montre que les dotations totales sont globalement ‘moyennes’, avec une probabilité de 52%. Ainsi, 30% des dotations sont considérées comme étant bonnes, mais 18% restent mauvaises.

Tableau n° III-6 : Probabilités des allocations annuelles de chaque secteur, pour la gestion réelle.

Bonne	P11	>32	0.6
Moyenne	P12	[24,32]	0.3
Faible	P13	[0,24]	0.1
Bonne	P21	>10	0.5
Moyenne	P22	[8,10]	0.125
Faible	P23	<8	0.15
Bonne	P31	>40	0.05
Moyenne	P32	[25,40]	0.5
Faible	P33	<25	0.325

Lorsque nous considérons les dotations annuelles secteur par secteur, nous remarquons que l’AEP a une probabilité de 60% pour les bonnes satisfactions, et 10% pour les mauvaises. Pour le secteur de l’industrie, 50% des allocations étaient considérées comme bonnes, et seulement 15% comme faibles. La satisfaction du secteur de l’irrigation, quant à elle est moyenne à mauvaise ; en effet, nous n’avons, dans le passé, que 5% de bonnes satisfactions, 50% sont moyennes, et 32% sont faibles.

Ainsi et de manière générale, nous remarquons que la priorité est donnée au secteur de l’AEP, ensuite à l’industrie, et enfin, l’irrigation.

Analysons à présent les taux de satisfaction annuels des trois secteurs confondus.

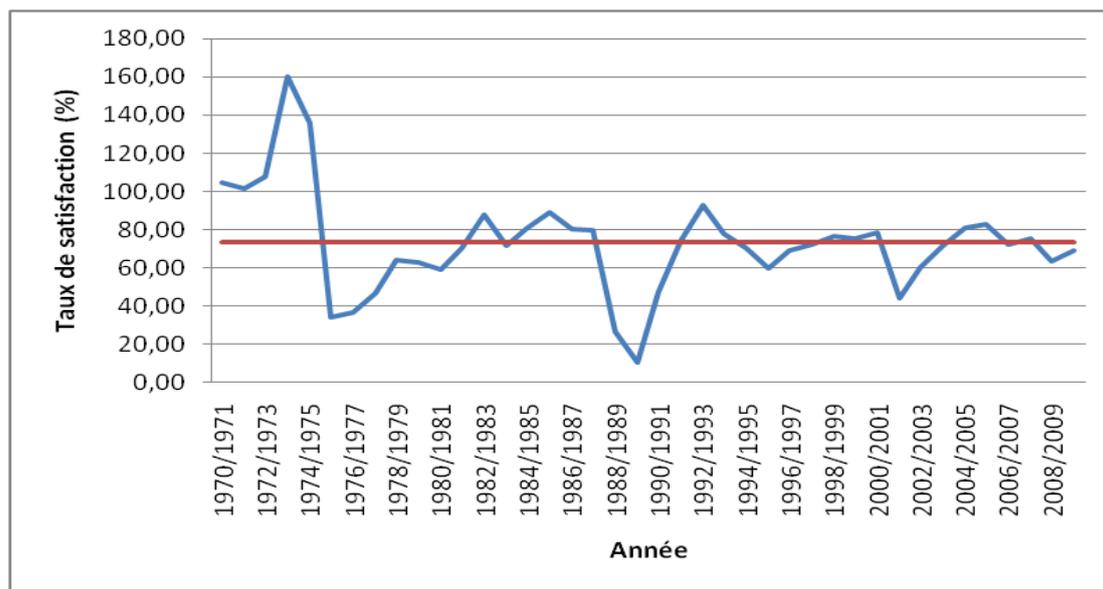


Figure n° III-11: Variation du taux de satisfaction annuel total de la gestion réelle.

Nous remarquons une importante fluctuation du taux de satisfaction annuellement. En occultant les années précédant 1975, le taux de satisfaction n'égale jamais les 100%. Celui-ci a atteint la faible valeur de 10% en 1989/1990. En outre, le taux de satisfaction global moyen de la gestion réelle est de 66%, ce qui est au-dessus de la moyenne.

III.8. Gestion manuelle

Après avoir analysé la gestion historique du barrage de la Cheffia en premier lieu, nous allons nous substituer au gestionnaire en second lieu et prendre nos propres décisions concernant les lâchers. La différence entre les deux gestions est notable : en effet, nos décisions seront influencées par la connaissance des apports futurs, ainsi que la possibilité de revenir sur nos décisions si ces dernières s'avèrent être mauvaises, ce qui rendra notre gestion proche de l'idéal. C'est en réalité une forme manuelle d'amélioration ou d'optimisation de la gestion.

III.8.1. Equation de continuité

Afin d'accomplir cette gestion, nous nous fixons comme objectif de se rapprocher le plus possible des lâchers optimaux, donc, de la demande réelle des trois secteurs. Cette démarche constituera une nouvelle variante de gestion qui permettra de donner un maximum d'eau à l'aval, sans avoir de surverse ou de niveau inférieur au niveau mort. Pour effectuer cette simulation, une automatisation de l'équation de continuité a été faite sur Excel, en prenant en compte les résultats de l'ACP sur les 14 paramètres du barrage.

L'équation de continuité est la suivante :

$$V_i(i) + App(i) - AEP(i) - AEI(i) - Irr(i) - Evap(i) - Vid(i) - Fuit(i) = V_f(i)$$

Avec :

i : Désigne le mois considéré,

V_i : Volume au début du mois i considéré en Mm^3 .

App : Les apports au barrage au mois i en Mm^3 .

AEP : Les lâchers pour l'Alimentation en Eau Potable de la Wilaya de Annaba en Mm^3 .

AEI : Les lâchers pour l'alimentation de l'industrie en Mm^3 .

Irr : Les lâchers pour l'irrigation en Mm^3 .

$Evap[i]$: Evaporation en Mm^3 .

Vid : Vidanges en Mm^3 .

$Fuit$: Fuites en Mm^3 .

V_f : Volume à la fin de mois i (correspond au volume au début de mois $i+1$ en Mm^3 .)

Dans cette équation, seuls les apports, les fuites et le volume initial du barrage au début du mois de Septembre 1970 sont pris de l'historique. Ainsi, nous n'avons d'influence que sur les valeurs des allocations pour le secteur de l'AEP, l'AEI et l'Irrigation. Tous les autres paramètres seront issus de calculs par le biais d'équations appropriées.

III.8.1.1. Détermination des allocations des trois secteurs

Les allocations des trois secteurs sont choisies selon les demandes, et doivent être bornées entre les demandes max et min.

III.8.1.1.1. Demande maximale

La demande est fixée par les organismes en rapport avec le secteur. Elle est donnée en valeur annuelle, pour chaque secteur :

- **Alimentation en Eau Potable** : $40 Mm^3$, ce qui conduit à une demande mensuelle à peu près égale à $3.33 Mm^3$.
- **Alimentation en Eau pour l'Industrie** : $12 Mm^3$, ce qui conduit à une demande mensuelle d' $1 Mm^3$.
- **Irrigation** : $50 Mm^3$, alloués de manière inégale entre les mois ; en effet, la période d'irrigation commence en Avril, et se termine en Novembre. Elle enregistre son

maximum au mois de Juillet. Nous avons donc un volume de 50 Mm^3 à répartir entre Avril et Novembre, le reste des mois se verra attribuer une dotation nulle.

Nous avons donc constitué le vecteur de la demande suivante :

Tableau n° III-7 : Demande maximale des trois secteurs (AEP, AEI et Irrigation).

Demande	AEP	Irr	AEI	Demande totale mensuelle
Mois				
septembre	3.33	6	1	10.33
Octobre	3.33	3.5	1	7.83
Novembre	3.33	1.5	1	5.83
Décembre	3.33	0	1	4.33
Janvier	3.33	0	1	4.33
Février	3.33	0	1	4.33
Mars	3.33	0	1	4.33
Avril	3.33	1.5	1	5.83
Mai	3.33	5	1	9.33
Juin	3.33	8	1	12.33
Juillet	3.33	15	1	19.33
Août	3.33	9.5	1	13.83
Demande Totale annuelle	39.96	50	12	101.96

III.8.1.1.2. Demande minimale

La demande minimale n'étant pas une donnée disponible, nous avons cherché dans l'historique la demande minimale que le gestionnaire ait eu à donner, en occultant les années d'extrême sécheresse, et en la majorant, ainsi on sera au mieux juste, et au pire au dessus de la demande minimale.

Tableau n° III-8 : Demande minimale des trois secteurs (AEP, AEI et Irrigation).

Demande	AEP	Irr	AEI	Demande totale mensuelle
Mois				
Septembre	0.7	0.12	0.4	1.22
Octobre	0.7	0.07	0.4	1.17
Novembre	0.7	0.03	0.4	1.13
Décembre	0.7	0	0.4	1.1
Janvier	0.7	0	0.4	1.1
Février	0.7	0	0.4	1.1
Mars	0.7	0	0.4	1.1
Avril	0.7	0.03	0.4	1.13

Demande	AEP	Irr	AEI	Demande totale mensuelle
Mois				
Mai	0.7	0.1	0.4	1.2
Juin	0.7	0.16	0.4	1.26
Juillet	0.7	0.3	0.4	1.4
Août	0.7	0.19	0.4	1.29
Demande Totale annuelle	8.4	1	4.8	14.2

III.8.1.2. Calcul du volume d'eau évaporé du barrage

Le volume d'eau évaporé du barrage dépend de la surface du plan d'eau dans la réserve, qui, à son tour dépend du volume d'eau dans cette dernière. Il est donc primordial de trouver une relation qui permet de calculer la surface de l'eau en fonction du volume. Cette dernière sera obtenue en traçant la courbe « Surface- Volume », représenté dans la figure suivante :

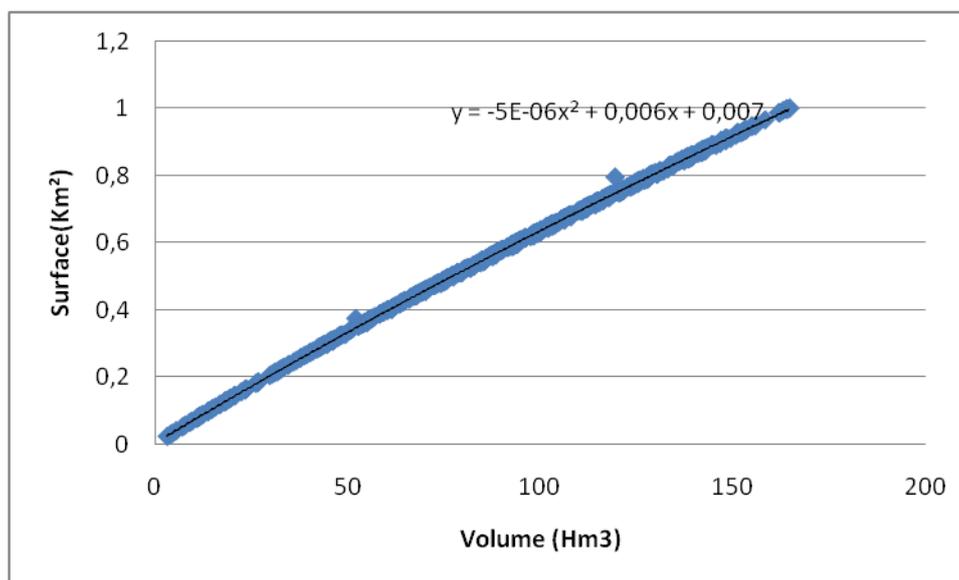


Figure n° III-12 : Surfaces en fonction des volumes.

L'équation "Surface=f(Volume)" est la suivante :

$$\text{Surface} = (-5) \times \text{Volume}^2 + 0.006 \times \text{Volume} + 0.007.$$

Ainsi, l'évaporation répondra à l'équation : $Evap(i) = \text{Lame d'eau évaporée} \times \text{Surface}$

Remarque : La lame d'eau évaporée dans un mois i est obtenue en divisant le volume d'eau évaporé durant le mois considéré par la surface de l'eau évaporée, et ce, pour l'historique des données.

III.8.1.3. Calcul des cotes d'eau dans le barrage

Il est utile de calculer les côtes en début et fin de mois : ces dernières sont obtenues par le tracé des courbes "Cotes_Volumes" : ainsi, en ayant le volume au mois i , nous pouvons obtenir la cote de ce mois là (début ou fin) aisément.

Le tracé de la courbe est représenté dans la figure suivante :

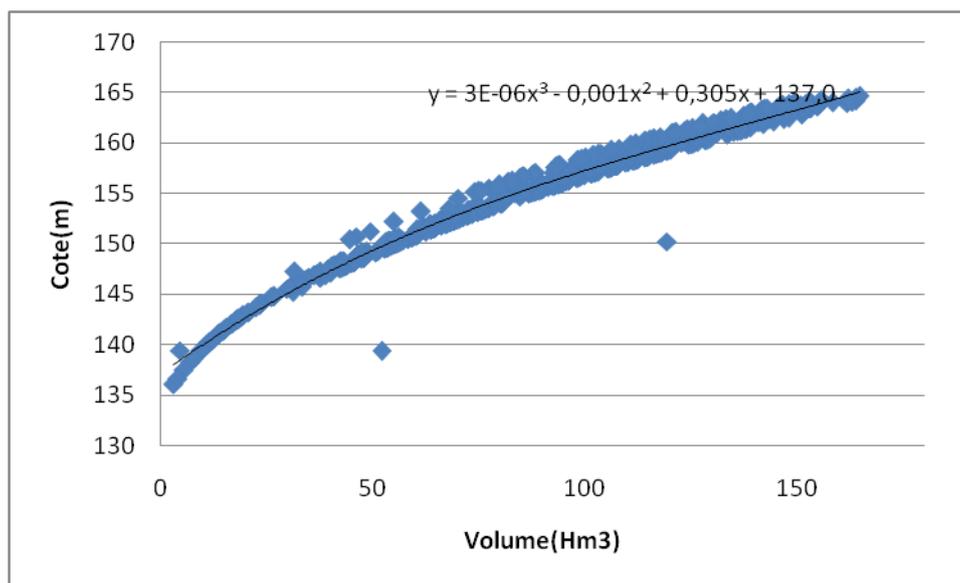


Figure n° III-13 : Les cotes en fonction des volumes.

L'équation "Cote=f(Volume)" est la suivante :

$$Cote = 3 \times Volume^3 \times 10^{-6} - 0.001 \times V^2 + 0.305 \times V + 137.0$$

III.8.1.4. Calcul du volume d'eau vidangé

La vidange est programmée lorsque la cote dépasse la cote maximale du barrage, ou d'une autre manière, lorsque le stock maximal de la réserve est dépassé, donc, quand le taux de remplissage dépasse les 100%. Pour notre cas, nous considérons qu'il y aura vidange lorsque :

$$V_f - V_{mort} > V_{utile}$$

III.8.1.5. Calcul de la consommation totale

La consommation totale est tout simplement la somme des consommations des trois secteurs confondus.

III.9. Analyse de la gestion manuelle

A l'issue de cette gestion, nous pouvons faire les constatations suivantes :

- ✓ La première des choses que nous remarquons -et pas des moindres- est qu'il est très difficile de gérer un barrage sans outil approprié; Même en ayant le gros avantage de connaître les apports futurs exacts, il nous a été nécessaire de revenir plusieurs fois sur nos décisions afin de trouver le moyen idéal de prévenir les défaillances, ce qui est en soi très contraignant en terme de temps de calcul.
- ✓ Aucun moyen n'a été trouvé afin que la dotation soit égale à la demande exacte ; en effet, les périodes de sécheresse connaissent forcément une diminution de la dotation.
- ✓ La gestion réelle du barrage durant les quarante années ne sont pas si catastrophiques ; en effet, si nous avions alloué la demande exacte, nous serions entrés plusieurs fois en défaillance, or, le gestionnaire lui n'en a connu que deux.
- ✓ Une autre remarque concerne le barrage en lui-même : La réserve se remplit et se vide très rapidement : en effet, il y a des années où nous sommes obligés d'effectuer des vidanges, et celles ci sont très importantes, suivies de chutes vertigineuses du taux de remplissage nécessitant une réduction de l'allocation afin d'éviter la défaillance. Ceci traduirait peut être le fait que le barrage ne remplisse pas totalement son rôle de régularisation : en effet, le premier rôle d'un barrage réservoir est de stocker l'eau en périodes humides pour la redistribuer en périodes sèches.

III.9.1. Comparaison de la simulation des gestions manuelles et réelles

Comme pour la gestion réelle, la gestion manuelle sera jugée en fonction des probabilités obtenues dans les tableaux n° III-3 et III-4. Les probabilités annuelles de la gestion manuelle sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n° III-9 : Comparaison des Probabilités annuelles globales des gestions réelle et manuelle.

Probabilités des lâchers Totaux			Historique	Manuelle
Bonne	P1	> 82	0.3077	0.825
Moyenne	P2	[57 82]	0.5128	0.075
Faible	P3	< 57	0.1795	0.1

En comparant la gestion manuelle à celle de l'historique en termes de probabilités de satisfaction des trois secteurs confondus, nous remarquons un accroissement de 52% de dotations totales situées dans la tranche des bonnes satisfactions. En effet, nous sommes passés de 31% en gestion réelle à 83% en gestion manuelle. Ce qui est en soi un excellent résultat. Les Probabilités annuelles par secteur sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n° III-10 : Comparaison des Probabilités annuelles pour chaque secteur des gestions réelle et manuelle

		Probabilités par secteur			Historique	Manuelle
AEP	bonne	P11	>32	0.6	0.825	
	Moyenne	P12	[24,32]	0.3	0.075	
	Faible	P13	[0,24]	0.1	0.1	
AEI	bonne	P21	>10	0.5	0.875	
	Moyenne	P22	[8,10]	0.125	0.05	
	Faible	P23	<8	0.15	0.075	
Irrigation	Bonne	P31	>40	0.05	0.725	
	Moyenne	P32	[25,40]	0.5	0.2	
	Faible	P33	<25	0.325	0.05	

Les résultats de la gestion manuelle sont très intéressants ; En effet, nous sommes passés de la probabilité de 60% pour les bonnes satisfactions pour l'AEP en gestion réelle à 83% en gestion manuelle. Pour l'AEI, un accroissement de 37% a été noté pour les probabilités d'avoir de bonnes satisfactions, et l'irrigation a vu son pourcentage de bonnes satisfactions flamber, avec un accroissement de 72.5%.

La figure suivante représente les taux de satisfactions annuels des gestions manuelle et réelle.

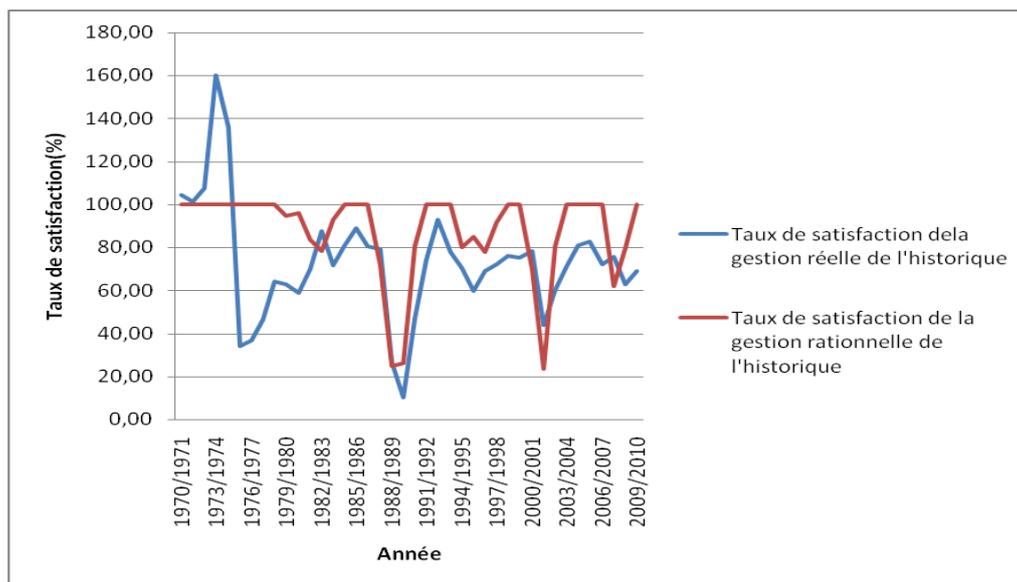


Figure N° III-14 : Comparaison des taux de satisfactions annuels des gestions manuelle et réelle.

Nous remarquons une nette amélioration des taux de satisfaction de la gestion manuelle. Ces derniers atteignent les 100% en période humide, et diminuent quand même en période sèche. Le taux de satisfaction le plus faible est de 20%, ce qui représente 10% de plus que la gestion réelle. Cette valeur reste tout de même faible.

La figure suivante est issue de l'ACP sur la gestion manuelle et représente la corrélation de la première CP' à la seconde :

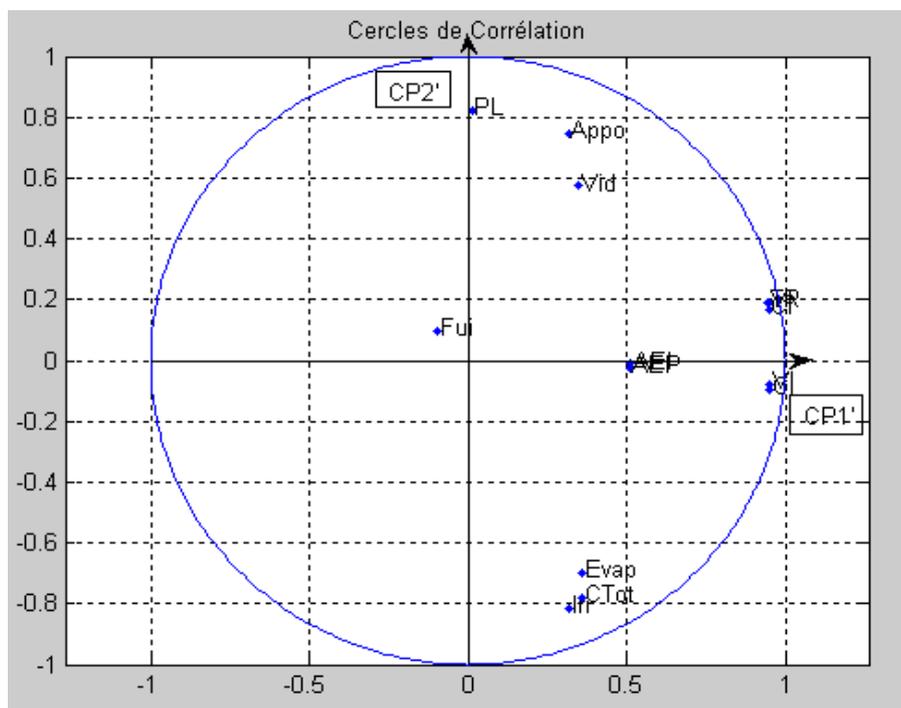


Figure N° III-15 : Cercle de corrélation CP1'-CP2' de la gestion manuelle. Lorsque nous interprétons le cercle de corrélation précédent, nous remarquons que :

- ✓ L'irrigation est corrélée à la consommation totale et à l'évaporation, ce qui paraît plus logique que la première gestion.
- ✓ L'AEP est parfaitement corrélée à l'AEI ce qui prouve qu'une priorité a été donnée à ces deux secteurs.

A l'issue de cette gestion, il ne reste plus que les fuites comme paramètre au centre du cercle, qui ne sont corrélés à aucun autre paramètre. Les résultats de l'analyse en composantes principales sur la gestion manuelle sont représentés dans l'annexe I.

III.10. Conclusion

Nous nous sommes attelés, à l'analyse de la gestion historique du barrage, les résultats obtenus prouvent que le gestionnaire ne possède aucune règle de gestion bien définie.

Ainsi, l'eau fournie par le gestionnaire aux différents secteurs n'est pas fonction de la demande, mais du volume d'eau dans la réserve utile, et de la décision instinctive de ce dernier. Nous pouvons relever aussi que les situations extrêmes ne sont pas bien maîtrisées.

La gestion manuelle, quant à elle a révélé que la gestion d'un barrage en général n'était pas évidente. Ajouté à cela la grande variabilité du climat de la région d'étude, et le fort aléa dont est imprégnée la ressource, la gestion du barrage de la Cheffia présente donc de grandes difficultés ; Ainsi, même la connaissance des apports futurs ne nous garantis pas toujours un taux de satisfaction élevé.

Au terme de ce chapitre, nous sommes convaincus de la nécessité de l'utilisation d'un outil performant, et approprié pour une optimisation de gestion. Ainsi, la connaissance des apports sur toute la période de gestion considérée est primordiale pour l'obtention de résultats satisfaisants.

CHAPITRE IV : OPTIMISATION DE LA GESTION HISTORIQUE PAR LES ALGORITHMES GENETIQUES

IV.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous nous sommes intéressés à l'optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par la méthode des algorithmes génétiques. Pour ce faire, nous avons élaboré un programme sous Matlab, reproduisant les opérateurs des algorithmes génétiques.

Une fois l'algorithme prêt, il a été testé sur les dix années entre 2000 et 2010 de différentes manières afin de sélectionner la méthode la plus performante. Cette dernière a été appliquée sur les 40 années de l'historique afin d'obtenir les lâchers optimums pour les trois secteurs cumulés. Les dotations de chaque secteur sont obtenues par le biais d'une répartition manuelle, sous Excel.

Nous avons entrepris ensuite une comparaison entre la gestion de l'historique, la gestion rationnelle et la gestion par algorithmes génétiques, et ce en termes de pénalités et de taux de satisfactions. Une Analyse en Composantes Principales a aussi été effectuée.

IV.2. Théorie des Algorithmes Génétiques

IV.2.1 Historique et analogie avec la biologie

Un algorithme génétique est un algorithme évolutionnaire. Généralement utilisé pour l'optimisation difficile, il permet de résoudre en un temps raisonnable des problèmes dont la solution est inconnue.

L'utilisation d'algorithmes génétiques dans la résolution de problèmes est à l'origine le fruit des recherches de John Holland et de ses collègues et élèves de l'Université du Michigan qui ont, dès 1960, travaillé sur ce sujet. La nouveauté a été de prendre en compte l'opérateur de croisement en complément des mutations. Le premier aboutissement de ces recherches a été la publication en 1975 de « *Adaptation in Natural and Artificial System* ».

Les premiers principes de la théorie de l'évolution ont été développés par « Charles Darwin ». Selon lui, l'évolution des systèmes vivants au cours des générations s'opère en deux étapes : la sélection et la reproduction.

- ✓ La sélection naturelle est un opérateur au niveau des populations qui mène à la mort sélective des plus faibles et la survie des individus les mieux adaptés à leur environnement.
- ✓ La reproduction est un opérateur de modifications successives aux individus de la population par mutation et recombinaison, chose qui entraîne une grande diversité entre deux populations d'une même espèce.

D'autre part, le fondateur de la génétique, John Mendel (1865) expliqua les lois de transmission des caractères à travers des générations dans le cadre d'une reproduction. Ces caractères héréditaires codés dans des **gènes** sont localisés dans le **génome** qui est le patrimoine génétique de chaque **individu**. La combinaison de deux **parents** du génome par des mécanismes de croisement et mutation fait engendrer deux **enfants** « individu » distincts possédant des traits propre à chaque parent.

Ces deux principes ont incités les chercheurs à travailler dessus afin de développer des algorithmes permettant la résolution de problèmes d'optimisation. Les algorithmes génétiques étant donc basés sur des phénomènes biologiques, il convient de rappeler au préalable quelques termes de génétique.

Les organismes vivants sont constitués de cellules, dont les noyaux comportent des chromosomes qui sont des chaînes d'ADN. L'élément de base de ces chromosomes (le caractère de la chaîne d'ADN) est un gène. Sur chacun de ces chromosomes, une suite de gènes constitue une chaîne qui code les fonctionnalités de l'organisme (la couleur des yeux ...). La position d'un gène sur le chromosome est son locus. L'ensemble des gènes d'un individu est son génotype et l'ensemble du patrimoine génétique d'une espèce est le génome, les différentes versions d'un même gène sont appelées allèles.

On utilise aussi, dans les algorithmes génétiques, une analogie avec la théorie de l'évolution qui propose qu'au fil du temps, les gènes conservés au sein d'une population donnée sont ceux qui sont le plus adaptés aux besoins de l'espèce vis à vis de son environnement. La génétique a mis en évidence l'existence de plusieurs opérations au sein d'un organisme donnant lieu au brassage génétique.

Ces opérations interviennent lors de la phase de reproduction, lorsque les chromosomes de deux organismes fusionnent. Les algorithmes génétiques imitent ces processus afin de faire évoluer les populations de solutions de manière progressive.

IV.2.3. Principe général

Lorsque l'on parle d'algorithmes évolutionnaires, les individus soumis à l'évolution sont des solutions potentielles au problème étudié. Ces solutions appartiennent (ou non, et nous le verrons par la suite de l'introduction du calcul de probabilités) à l'espace de recherche du problème d'optimisation. Cet ensemble d'individus qui va évoluer au fil des générations constitue une population. Les dites générations sont en fait une succession d'itérations. L'arrêt de l'algorithme se fait grâce à un critère, qui prend en compte à priori la qualité des solutions obtenues.

Durant chaque génération, une succession d'opérateurs est appliquée aux individus d'une population pour engendrer la nouvelle population à la génération suivante. Le ou les individus utilisés par un ou plusieurs opérateurs sont désignés comme étant des *parents*. Les individus résultant de l'application des opérateurs sur les parents sont des *enfants*. Ainsi, lorsque deux opérateurs sont appliqués en séquence, les enfants engendrés par l'un peuvent devenir des parents pour l'autre.

IV.2.4. Création de la population initiale

La rapidité de l'algorithme génétique est fortement conditionnée par le choix de la population initiale. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état (de recherche) est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associé aux composantes de l'espace de recherche en veillant à ce que les solutions produites respectent les contraintes.(Mechalewicz,1991).

Dans le cas où des informations sur le problème sont à priori disponibles, il convient de générer les individus dans un sous-domaine particulier, dans le but d'accélérer la convergence. Dans l'hypothèse où la gestion des contraintes ne peut se faire directement, les contraintes sont incluses sous forme de pénalités. Il est clair qu'il vaut mieux, lorsque c'est possible, ne générer que des éléments de population respectant les contraintes. (Jean_Marc, 2005).

IV.2.5. Opérateurs de sélection

Tous les individus ne participent pas forcément à la reproduction, et on ne les retrouve pas forcément à la génération suivante. En d'autres termes, à chaque génération, des individus

se reproduisent, survivent ou disparaissent de la population sous l'action de deux *opérateurs de sélection* :

- ✓ La sélection pour la reproduction, ou plus simplement *sélection*, qui détermine quels sont les individus qui seront considérés comme les parents. Dans certaines variantes d'algorithmes génétiques, cet opérateur désigne le nombre de fois où un individu va se reproduire ;
- ✓ La sélection pour le remplacement, ou plus simplement : le *remplacement*, qui détermine quels individus devront disparaître de la population à chaque génération, ou quels individus vont rester pour la génération suivante, de façon que, de génération en génération, la taille de la population reste constante, ou plus rarement, soit contrôlée selon une politique définie.

Conformément au crédo Darwiniste, un individu sera sélectionné pour se reproduire ou survivre d'autant plus souvent qu'il est meilleur. Il se peut, selon la variante d'algorithme, qu'un des deux opérateurs ne favorise pas les bons individus par rapport aux autres, mais il est nécessaire que l'application de l'ensemble des deux opérateurs durant une génération favorise les meilleurs.

A chaque génération, la performance des enfants doit être évaluée, car la sélection n'est possible que si une valeur de performance (qui dépend de la fonction objectif) est attachée à chaque individu. Cette évaluation peut être coûteuse en calculs. La construction d'une bonne *fonction de performances (fitness function)* est une priorité.

La sélection peut se faire selon plusieurs procédures, les plus couramment utilisées sont (Zabot, 2008) :

- ✓ La sélection par la roue de la fortune ;
- ✓ La sélection par tournoi ;
- ✓ La méthode élitiste.

IV.2.5.1. La sélection par la roue de la fortune (Roulette wheel selection)

Le principe de cette méthode, connue sous le nom de Monte-Carlo, consiste à associer à chaque individu un segment dans la roue dont sa longueur est proportionnelle à sa fitness. Ces segments sont ensuite concaténés sur un axe que l'on normalise entre 0 et 1. On tire alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1 puis on regarde quel est le segment

sélectionné. Avec ce système, les individus dont les segments sont les plus grands, sont ceux ayant les plus grands segments seront ceux ayant le plus de chance d'être sélectionnés. La figure suivante représente la sélection par la roulette.

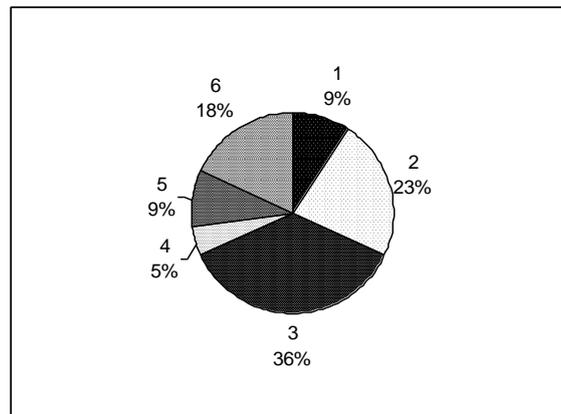


Figure n° IV-1 : Modèle de la roulette.

Bien que cette méthode soit la plus répandue, elle présente plusieurs inconvénients ; En effet, sur n individus sélectionnés pour être parents, il se pourrait qu'il n'y ait pratiquement aucun parent bien adapté, ce qui entraînerait l'élimination des individus de forte fitness, allant ainsi à l'encontre du principe des algorithmes génétiques. Inversement, une perte de diversité peut être provoquée par un individu si celui-ci présente une dominance écrasante.

En effet, si on dispose d'un individu qui présente une fitness très élevée, donc une partition dans la roue très grande, il est fort probable qu'après quelques générations successives on se retrouve avec une population ne contenant que des copies de cet individu. De ce fait, on se retrouve avec une convergence prématurée qui est l'un des critères d'arrêt des algorithmes génétiques.

Des améliorations ont été apportées pour écarter cet inconvénient tel que **le scaling**, qui produit un changement d'échelle en augmentant ou en diminuant la fitness d'un individu par rapport à un autre suivant l'écart de leur fitness.

IV.2.5.2. La sélection par tournoi

Le principe de cette méthode est de tirer aléatoirement un groupe de k individus parmi la population, et de sélectionner le meilleur d'entre eux. Ce processus est répété jusqu'à ce que le nombre d'individus de la population intermédiaire soit égal au nombre total d'individus formant la population initiale. La population est donc divisée en m groupes de k

individus. Ensuite, on sélectionne le meilleur individu de chaque groupe. Il faut k itérations pour remplir la population intermédiaire parce qu'à chaque fois, m individus sont sélectionnés ou m est défini par :

$$m = \frac{\text{taille de la population}}{k}$$

IV.2.5.3. La méthode élitiste

Dans cette méthode les meilleurs individus de la population P sont choisis et sélectionnés, après les avoir triés de manière décroissante selon leurs fitness. Cette méthode n'est pas toujours conseillée car elle conduit à une convergence prématurée de l'algorithme.

IV.2.6. Opérateurs de variation

L'algorithme génétique agit sur la population afin de trouver, au fil des générations, les meilleurs individus (les plus adaptés). Mais pour que l'algorithme génétique ne se comporte pas en simple algorithme de recherche, sur tout l'espace de recherche, et dans le but d'améliorer, dans sa globalité, la performance des individus au cours des générations, on leur applique les *opérateurs de variation* ou encore *opérateurs de recherche* ; Ces derniers permettent de trouver des combinaisons des individus de la population courante afin d'en trouver d'autres plus adaptés.

Ces opérateurs sont classés en deux catégories :

- ✓ Les opérateurs de *mutation*, qui modifient un individu pour en former un autre ;
- ✓ Les opérateurs de *croisement (crossover)*, qui engendrent un ou plusieurs enfants à partir de combinaisons de deux parents. Ces opérateurs, même s'ils s'inspirent de la reproduction sexuée des êtres vivants, ne connaissent pas les contraintes de la biologie ; ainsi, ils peuvent être généralisés à la combinaison de plus de deux parents (orgies), éventuellement à la combinaison de la totalité de la population.

Selon Dréo J., Pétrowsky A., Taillard E. (2003), la façon de modifier un individu dépend étroitement de la structure de la solution qu'il représente. Ainsi, si on veut résoudre un problème d'optimisation dans un espace continu, comme un domaine de R^n , alors il sera a priori adéquat de choisir un vecteur de R^n pour représenter une solution, et l'opérateur de croisement doit implanter un moyen de faire correspondre deux vecteurs de R^n pour les parents à un (ou plusieurs) vecteur (s) de R^n pour l'enfant.

Des exemples montrent toutefois qu'il ne saurait être question de concevoir des opérateurs de variation universels, indépendants du problème posé ; ils sont nécessairement liés à la représentation des solutions dans l'espace de recherche. En règle générale, pour une représentation choisie, il est nécessaire de définir les opérateurs de variation utilisés, car ils en dépendent étroitement.

IV.2.6.1. Les opérateurs de croisement

L'opérateur de croisement utilise deux parents pour former un ou deux descendants. Le croisement respecte généralement les propriétés suivantes :

- ✓ Le croisement de deux parents identiques donnera des descendants identiques aux parents ;
- ✓ Deux parents proches l'un de l'autre dans l'espace de recherche engendreront des enfants qui leurs seront proches.

Ces propriétés sont respectées par les opérateurs de croisement classiques, mais dans l'état actuel de la connaissance des algorithmes évolutionnaires, la construction d'un opérateur de croisement ne suit pas de règle précise. Les taux de croisement déterminent les proportions d'individus qui vont être croisés parmi ceux de l'ancienne génération. Pour une représentation binaire, il existe trois formes de croisements classiques :

- ✓ Le croisement « un point » ;
- ✓ Le croisement « multi points » ;
- ✓ Le croisement « uniforme ».

Un couple d'individus étant constitué d'un tirage dans la population, le croisement 'un point' [Holland 92] se déroule en deux étapes :

1. Choix aléatoire d'un point de coupure identique sur les deux chaînes ;
2. Coupure des deux chaînes et échange des deux fragments situés à droite.

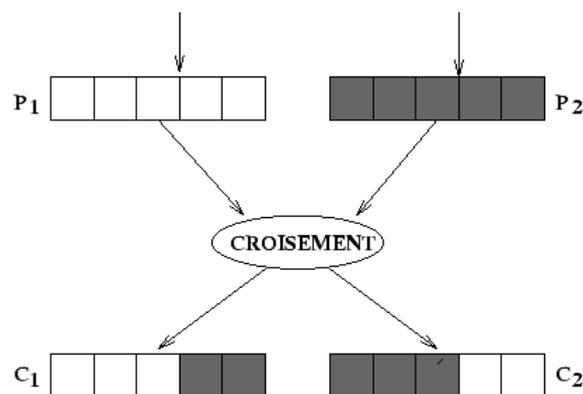


Figure n°IV-2 : Croisement à un point.

Une généralisation immédiate de cet opérateur consiste à multiplier les points de croisement.

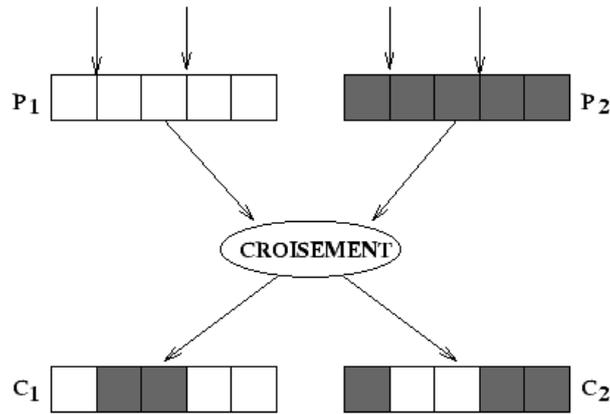


Figure n° IV-3 : Croisement à deux points.

Le croisement uniforme [Ackley 87] est une forme de croisement multipoints dont le nombre de coupures est indéterminé a priori. Pratiquement, on utilise ce que l'on appelle : « Masque de croisement », qui est une chaîne binaire de même longueur que les individus.

Un '0' à la $n^{\text{ième}}$ position du masque laisse inchangés les symboles à la $n^{\text{ième}}$ position des deux chaînes. Un '1' déclenche un échange des symboles correspondants.

Le masque est engendré aléatoirement pour chaque couple d'individus

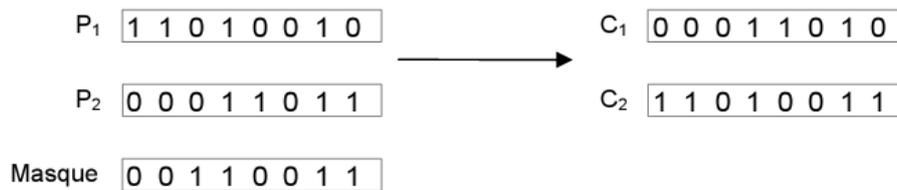


Figure n° IV-4 : Croisement à masque

IV.2.6.2. Les opérateurs de mutation

Classiquement, les opérateurs de mutation modifient aléatoirement un individu pour en former un autre qui le remplacera. La proportion des individus de la population qui vont muter est : le taux de mutation. Son ordre de grandeur peut varier notablement selon le modèle d'évolution choisi, mais il est généralement compris entre 0.01 et 0.1.

Pour les algorithmes génétiques, la mutation est considérée comme un opérateur mineur chargé de maintenir un minimum de diversité dans la population (ce que ne peut pas assurer le croisement), et ce, afin d'assurer une bonne exploration de l'espace de recherche.

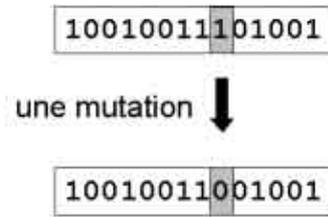


Figure n° IV-5 : Mutation.

IV.2.7. La boucle générationnelle

A chaque génération, un algorithme évolutionnaire effectue les quatre opérations suivantes, dans un tour de boucle jusqu'à satisfaction d'un critère d'arrêt :

- ✓ Sélection pour la reproduction des parents parmi une population de μ individus pour engendrer λ enfants ;
- ✓ Croisement et mutation à partir des parents sélectionnés engendrant les λ enfants ;
- ✓ Evaluation des performances des enfants ;
- ✓ Sélection pour la survie de μ individus parmi les enfants et les parents, ou uniquement parmi les λ enfants, ou parmi les enfants et les individus de la population. Cela se fait selon le jeu de paramètres choisi par l'algorithme.
- ✓ L'organigramme suivant représente la boucle générationnelle effectuée lors d'un algorithme génétique :

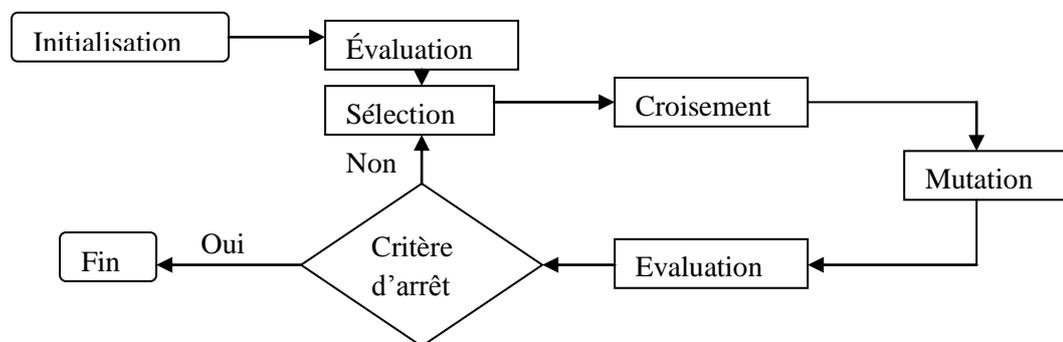


Figure n° IV-6 : Boucle générationnelle.

IV.2.8. Fonction de performance

La fonction de performance associe une valeur de performance à chaque individu afin d'en déterminer l'adaptation. Elle prend une grande part dans l'efficacité de l'algorithme, et il

est important d'accorder beaucoup de soin à la construction de cette dernière. En effet, c'est sur cette base là que nous désignons les individus qui vont être reproduit, et désignés pour faire partie de la génération suivante. Il est à noter que dans certains cas, la fonction de performance peut être la fonction objectif.

IV.2.9. Pénalités

Les problèmes d'optimisation doivent souvent respecter un certain nombre de contraintes. Celles-ci se traduisent par un ensemble de relations que doivent satisfaire les variables de la fonction dont on cherche les optimums. Lors de la résolution d'un problème numérique, ces relations sont généralement exprimées comme un ensemble de q inégalités :

$$G_i \leq 0 \text{ pour } i=1, \dots, q.$$

Où x est une solution du problème d'optimisation. Les éventuelles contraintes d'égalité sont remplacées par deux contraintes d'inégalité du type ci-dessus. Dans le cas des algorithmes évolutionnaires, le vecteur x est un individu. Lorsque les contraintes sont satisfaites par un individu, il est dit réalisable. Le domaine réalisable F est l'ensemble des solutions réalisables. Les complémentaires U de F dans l'espace de recherche Ω est le domaine irréalisable.

Les opérateurs de variation standards engendrent des individus de façon aveugle, ne tenant pas compte des contraintes, et qui peuvent correspondre à des solutions irréalisables. Pour imposer le respect des contraintes d'un problème, plusieurs approches agissant sur les différents opérateurs de l'algorithme évolutionnaire sont utilisables.

Une première approche, rudimentaire consiste à ne calculer la fonction de performance que dans l'espace réalisable F . Les individus de l'espace irréalisable se voient attribuer une performance nulle qui empêchera leur reproduction. Il s'agit de la méthode de la peine de mort (Deth penalty method). Cette méthode, qui a l'avantage d'être simple s'est avérée très peu performante car la topologie de F ne respecte que très rarement de bonnes propriétés, comme la convexité et la connexité.

D'autre part, le praticien constate que, sur les problèmes qu'il a à traiter, nombre d'optimums globaux réalisables se situent sur la frontière de F et disposer d'instances de solutions de part et d'autre de cette frontière aide à découvrir ces optimums. Une approche devenue classique est la pénalisation de la fonction de performance.

Cette méthode stipule que la performance d'un individu est réduite par soustraction d'une pénalité.

$$F_p(x) = f(x) - p(x)$$

Où $p(x)$ est positive, croissante par rapport aux mesures de violation des contraintes $\mu_i(x)$, tel que :

$$\begin{cases} \mu_i(x) > 0 & \text{si la } i\text{ème contrainte est violée} \\ \mu_i(x) = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Typiquement,

$$P(x) = P \left(\sum_{i=1}^q \alpha_i \mu_i^\beta(x) \right)$$

Où : P est une fonction croissante

α est un coefficient positif dont la valeur est d'autant plus grande qu'il est accordé d'importance au respect des contraintes.

β est fixé typiquement à 1 ou 2.

IV.2.10. Considérations sur la convergence des Algorithmes Génétiques (AG)

On dira qu'un algorithme évolutionnaire a convergé vers un optimum global si, après un nombre suffisant de générations, au moins un individu a pu se trouver dans un voisinage arbitrairement petit de cet optimum. Il n'existe pas de preuves de convergence globale d'un algorithme évolutionnaire. La gestion obtenue par Algorithme Génétique sera ainsi comparée à la gestion manuelle, en termes de taux de satisfactions et de probabilités.

IV.3 Programmation des Algorithmes Génétiques

IV.3.1 Nature des individus

Les algorithmes génétiques agissent sur une population de solutions potentielles au problème posé. Pour pouvoir utiliser cette méthode, il est impératif de désigner les individus en question.

Dans le cas de l'optimisation de la gestion d'un barrage, l'individu représente les 'lâchers', ou les allocations vers les trois secteurs : Alimentation en Eau Potable, Alimentation en Eau Industrielle, et l'Irrigation.

En d'autres termes, les chromosomes sont une chaîne de valeurs réelles, ou un vecteur constitué des différentes allocations mensuelles durant la période désignée : elle peut être égale à une année dans une gestion annuelle, ou plus, selon la gestion désirée. Ainsi, la longueur de l'individu est égale au nombre de mois sur lesquels la gestion est effectuée.

IV.3.2. Fonction objectif

Une fois la nature des individus déterminée, nous devons passer à l'élaboration de la fonction objectif du système ; cette dernière devra décrire ce que les individus de la population (ou chromosomes) devront maximiser ou minimiser.

La détermination de cette fonction n'est en général pas chose facile, étant donnée qu'elle consiste en une formulation mathématique du problème. Mais à la lumière des résultats obtenus par la démarche d'optimisation via l'équation de continuité (Chapitre III), la fonction objectif du problème est apparue d'elle même.

En effet, l'objectif de notre gestion est de maximiser les lâchers à l'aval ; en d'autres termes, il faut minimiser l'écart entre les lâchers et la demande réelle. Cet écart est calculé pour chaque mois, et pour que cette fonction soit significative, il faudrait sommer ces écarts mensuels, sur toute la durée de la gestion. Une élévation au carré de ces écarts permet de majorer l'importance des grands écarts.

$$F = \text{minimiser} \left\{ \sum_{i=1}^n (\text{Demande} - \text{Lâchers})^2 \right\}$$

Il est à noter que dans ce travail, les algorithmes génétiques ne nous permettent pas une optimisation multi-objectifs mais une optimisation mono-objectif ; c'est-à-dire que ce n'est pas l'allocation pour chaque secteur qui sera optimisée, mais l'allocation pour les trois secteurs confondus.

IV.3.3 Détermination de la demande

Comme nous l'avons dit précédemment, il serait judicieux que la population initiale (créée aléatoirement) se rapproche du domaine réalisable afin de diminuer le temps de recherche. Ainsi, nous avons décidé de borner les lâchers entre une demande minimale, et une demande maximale. Ces dernières ont été décrites au chap.3, paragraphe 8.1.1).

Remarque : Il est important de dire qu'effectivement, cette demande est variable, et il ne sera pas toujours juste d'utiliser le même vecteur de demande mensuelle, mais ceci ne constituera qu'un détail une fois le programme validé, étant donné que ce vecteur est un vecteur de données, que l'on peut facilement modifier au grès des exécutions.

IV.3.4 Détermination des volumes d'eau dans la réserve

Il est évident que le fait de maximiser la dotation n'est pas en soi suffisant pour désigner une gestion optimale : en effet, nous avons une contrainte sur le volume d'eau dans le barrage ; La réserve a une capacité maximale de $171,992 \text{ Mm}^3$, et les volumes d'eau doivent évidemment être toujours positifs.

Pire encore, le volume d'eau dans le barrage se divise en deux parties : le volume utile, qui est exploitable, et le volume mort, dans lequel nous ne pouvons puiser la ressource, sauf en cas de force majeure. Dans le barrage de la Cheffia, ce volume est fixé à 30 Mm^3 .

En d'autres termes, le volume à la fin de chaque mois au courant de la gestion ne doit pas descendre en dessous du volume mort et ne doit pas non plus excéder la capacité maximale du barrage. Une alternative existe toutefois si le volume final excède le volume maximal, et ce, en générant une vidange. Ce volume relâché à la nature sera désigné par Vid.

Afin de calculer le volume final dans le barrage, nous utilisons le même principe que nous avons utilisé dans le chapitre précédent à savoir : « l'équation de continuité ». Dans cette équation, les données sont :

- ✓ Volume initial du premier mois de la gestion (le reste des volumes initiaux sera calculé grâce aux volumes finaux de chaque mois) ;
- ✓ Fuites (qui sont prises de l'historique, étant donné que nous allons tester ce programme sur les 40 années de l'historique) ;
- ✓ Lame d'eau évaporée.

IV.3.5. Pénalités et fitness fonction

Jusque là, rien n'empêche le volume d'eau dans le barrage de descendre en dessous du volume mort. Les individus qui engendrent un volume final inférieur au volume mort se verront administrer une pénalité qui viendra s'ajouter à la valeur de la fitness fonction :

$$Fitness = F_{\text{objectif}} + Pénalité$$

$$Pénalité(j) = 500^2 \times \sum_{i=1}^{i=N\text{mois}} g(i)$$

$$g(i) = (Vmort(i) - Vf(i))^2$$

Où N mois : Nombre de mois que contient la gestion.

IV.3. 6 Sélection pour la reproduction

Dans la variante des algorithmes génétiques adaptée, tous les individus de la population ne constitueront pas forcément des parents ; en effet, seulement 80% des individus sont sélectionnés pour être parents. La méthode de sélection utilisée est une méthode qui permet de sélectionner 40% des parents par élitisme, et les 40% restants par tournois avec remise. Supposons donc que la taille de la population soit T-pop. La taille des parents sera donc de $0.8 \times T_{pop}$.

IV.3. 6 Croisement

Pour le croisement, deux types de croisements ont été testés sans donner de très bons résultats : le croisement à un point, et le croisement à deux points. Le dernier croisement ayant été testé fut celui du croisement à masque qui s'est avéré satisfaisant. Les parents sont croisés deux à deux, engendrant ainsi deux enfants chacun. Nous aurons ainsi $0.8 \times T_{pop}$ enfants.

IV.3. 7 Mutation

A présent, nous allons appliquer l'opérateur de mutation sur les enfants, en se fixant un taux de mutation de 5% (ie : 5% des enfants peuvent éventuellement muter). Un nombre aléatoire, $y1$ sera généré afin de déterminer le nombre d'enfants qui va muter (qui sera compris entre 0 et 5% de la taille des enfants.).

Une fois le nombre d'enfants qui va muter désigné, nous générons $y1$ nombres aléatoires compris entre 0 et 1, et ce dans le but de désigner quels sont parmi tous ces enfants le ou les individus qui vont muter.

Après avoir désigné les enfants sur lesquels on appliquera la mutation, nous allons désigner, par un nombre aléatoire compris entre 1 et la taille de l'individu le gène qui va muter. Et on répète la procédure pour les $y1$ individus qui vont muter.

IV.3. 8 Sélection pour le remplacement

Après l'évaluation des enfants, nous passons à la sélection pour le remplacement ; une nouvelle génération sera née. La variante des algorithmes génétiques utilisée est une variante dont la taille de la population en début de génération est toujours la même. Aussi, elle prend en compte tous les enfants. Il restera ainsi 20% d'individus pour compléter la nouvelle génération. Ces 20% d'individus sont sélectionnés par élitisme dans la génération courante.

IV.3. 9 Taille de la population et nombre de générations

La taille de la population ainsi que le nombre de génération sont importants lors de l'exécution d'un algorithme génétique. Il faut cependant savoir que ce programme n'a pas été créé pour une gestion annuelle seulement mais pour une gestion sur une durée indéfinie, calculée en mois. Toutefois, plus le nombre de mois augmente, plus le nombre de générations, et la taille de la population augmentent.

Nous pouvons donner quand même pour exemple une gestion sur 12 mois (gestion annuelle), nécessitant une population de 300 individus et d'un nombre d'itération égal à 800.

IV.4 .Test de l'algorithme génétique entre 2000-2010

Pour analyser les résultats des AG, nous avons choisi d'entreprendre des tests de gestion sur les années 2000 jusqu'à 2010 en divisant cette période en deux périodes principales : la première période commence en Septembre 2000 et se termine en Août 2005. La seconde commence en Septembre 2005 et se termine en Août 2010.

Ces tests consistent à gérer de différentes manières ces deux périodes, et ce en considérant des périodes de gestions différentes à chaque fois : ainsi, l'algorithme pourra donner une gestion sur plusieurs années à la fois, ou année par année, pour une même période.

La meilleure gestion sera celle ayant le taux de satisfaction global le plus important, tout en assurant une bonne répartition des taux de satisfaction. Aussi, il faudrait que cette gestion évite au maximum les défaillances.

Des différents essais résultent les gestions suivantes :

- ✓ **Gestion11** : L'algorithme génétique traite la gestion année par année depuis 2000 jusqu'en 2010. Nous avons en tout 10 années, donc 10 exécutions de l'algorithme.

Avec un taux de satisfaction global de 87%, la gestion11 est intéressante.

- ✓ **Tableau n° IV-1** : Taux de satisfactions annuels de la gestion 11.

Année	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
G11	97.25	14.22	84.47	99.93	99.98	99.99	99.92	97.96	76.74	99.96

Mais nous remarquons qu'en 2001/2002, le taux de satisfaction n'était que de 14% ce qui constitue en soi une faiblesse.

Tableau n° IV-2 : Mois de défaillance lors de la gestion11.

Mois	Volume initial
Septembre 2002	29.9999
Octobre 2002	28.7505
Novembre 2002	27.6164
Octobre 2008	28.9849
Novembre 2008	27.6704
Décembre 2008	27.7091
Janvier 2008	29.5884

De plus, les volumes initiaux dans le barrage sont descendus en dessous du volume mort durant les mois de Septembre, Octobre et novembre 2002, ainsi que les mois de Septembre, Octobre Novembre et Décembre 2009. (Tableau n° IV.1) :

Nous avons en tout sept mois de défaillance. Celle-ci n'excède toutefois pas les 3 millions de m^3 et s'explique par le fait que l'algorithme prend pour principal contrainte le fait de ne pas atteindre le volume mort durant une année : il peut donc prendre sa gestion optimale en tenant compte d'un volume frisant tout juste le volume mort au dernier mois de sa gestion, ce qui constitue en soi un problème pour l'année de gestion suivante qui, si elle ne reçoit pas suffisamment d'apport est obligée d'empiéter sur le volume mort pour satisfaire au moins la demande minimale.

A travers ces résultats, on peut voir l'importance de l'utilisation des probabilités. Ainsi, l'utilisation de la peine de mort aurait été néfaste.

Gestion12 : La période entre 2000 et 2005 est gérée années par année. Quant à celle située entre 2006 à 2010, elle est gérée en une seule fois.

La gestion12 améliore la gestion11 dans le nombre de mois de défaillance ; ainsi, on n'enregistre de défaillances qu'aux mois de Septembre, Octobre et Novembre 2002. Ce sont évidemment les mêmes défaillances que la période de la Gestion 11. En prenant toutes les années ensemble, la gestion 22 a donc remédié au problème de défaillance. (Tableau ci-dessous) :

La gestion de la deuxième période

Tableau n° IV-3 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 12.

Année	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
G12	97.28	14.22	84.48	99.93	99.98	94.72	90.71	89.55	97.06	99.90

Le taux de satisfaction global de cette gestion est de 86,8%, ce qui est légèrement inférieur à celui de la gestion 11. En conséquence, la gestion 12 n'améliore pas la gestion en général, mais si l'on regarde de plus près les taux de satisfactions annuels, on remarque que durant la seconde période, il y a une meilleure répartition des taux de satisfaction par rapport à la gestion11, et le nombre de mois de défaillance est moins important.

- ✓ **Gestion21** : Les années entre 2000 et 2005 sont traitées ensembles par l'algorithme génétique, donc une exécution de l'algorithme, tandis que les années entre 2006 et 2010 sont prises séparément pour une gestion année par année, ce qui fait cinq exécutions de plus. Les taux de satisfactions de cette gestion sont représentés ci-dessous :

Tableau n° IV-4 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 21.

Année	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
G21	52.09	47.47	89.47	99.87	99.89	99.92	99.96	97.95	76.71	99.91

Dans cette gestion, on remarque que les mois de défaillance de la première année ont disparus ; mais il reste toujours le problème des mois de défaillance de la seconde période. Ainsi, le taux de satisfaction global est de 86,3%, ce qui ne constitue pas en soi une amélioration, mais on remarque que le taux de satisfaction de l'année 2002 est passé de 14.22 à 47.5%.

- ✓ **Gestion22** : Les années de 2000 à 2005 sont gérées ensembles, de même pour les années de 2006 à 2010.

Tableau n° IV-5 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 22.

Année	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
G22	52.09	47.47	89.47	99.87	99.89	94.90	90.84	88.91	97.35	99.64

Comme le montre le tableau ci-dessus, la gestion 22 améliore la répartition des taux de satisfactions annuels. En effet, elle n'enregistre aucun mois de défaillance. Son taux de satisfaction global est de 86% ; il est inférieur par rapport aux autres de 1%, ce qui est logique puisque le volume mort n'a pas été touché.

- ✓ **Gestion 3** : L'algorithme génétique considère à la fois toutes les années entre 2000 et 2010, ce qui donne une seule exécution du programme.

Tableau n° IV-6 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 3.

Année	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
G3	50.19	50.73	87.82	99.72	99.78	94.20	89.97	92.52	95.26	99.73

Le taux de satisfaction est de 86%, et est par conséquent très proche de la gestion 22. En revanche, ce taux de satisfaction aurait pu être supérieur si l'année 2006 avait été une année sèche ; en effet, la coupure entre les deux exécutions de l'algorithme entre la première période et la seconde auraient pu être un point négatif pour la gestion 22. L'utilisation de la gestion 3 préviendrait ainsi tous les problèmes de défaillance, et permettrait une meilleure appréhension des périodes sèches.

- ✓ **Gestion 4** : C'est la gestion manuelle effectuée dans le chapitre III, de 2000 à 2010. Cette gestion, avec son taux de satisfaction global de 81% est inférieure à toutes les autres gestions testées par les algorithmes génétiques. Ce qui prouve que la méthode des AG est performante.

Tableau n° IV-7 : Taux de satisfactions annuels de la gestion 4.

Année	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
G4	69.94	23.73	80.59	100.00	100.00	100.00	100.00	62.17	79.68	100.00

Les résultats des taux de satisfactions des différentes gestions sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau n° IV-8 : Résultats des taux de satisfactions des gestions entre 2000 et 2010.

	Gestion11	Gestion12	Gestion21	Gestion22	Gestion3	Gestion4
2000/2001	97.28	97.28	52.09	52.09	50.19	69.94
2001/2002	14.22	14.22	47.47	47.47	50.73	23.73
2002/2003	84.48	84.48	89.47	89.47	87.82	80.59
2003/2004	99.93	99.93	99.87	99.87	99.72	100.00
2004/2005	99.98	99.98	99.89	99.89	99.78	100.00
2005/2006	99.94	94.72	99.92	94.90	94.20	100.00
2006/2007	99.93	90.71	99.96	90.84	89.97	100.00
2007/2008	97.96	89.55	97.95	88.91	92.52	62.17
2008/2009	76.75	97.06	76.71	97.35	95.26	79.68
2009/2010	99.97	99.90	99.91	99.64	99.73	100.00
TOTAL	87.04	86.78	86.32	86.04	85.99	81.61
Nombre de mois où le V_{mort} a été atteint	7mois	3 mois	4mois	0 mois	0 mois	0 mois

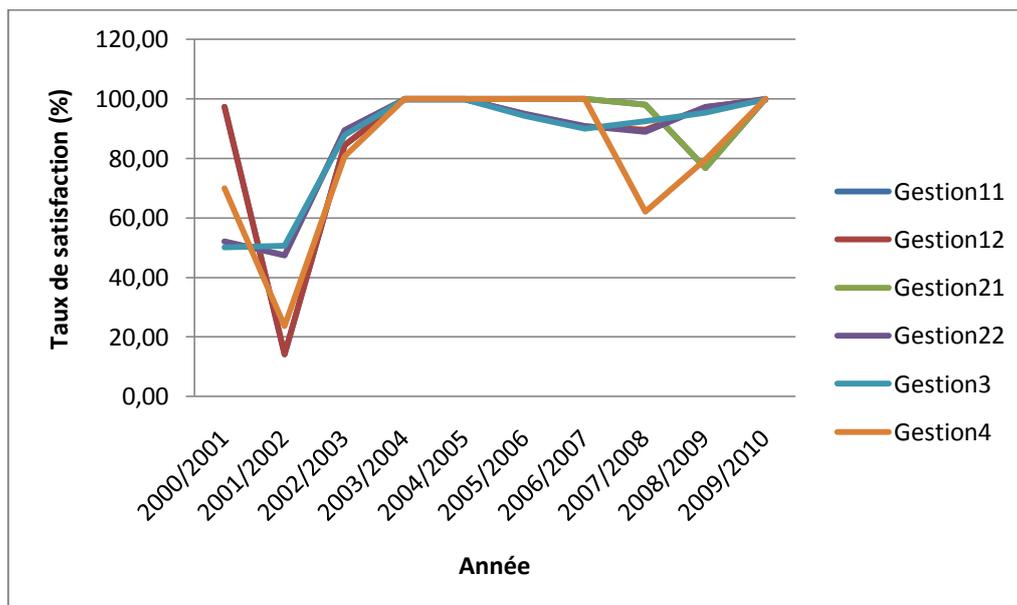


Figure n° IV-7 : Taux de satisfaction des gestions entre 2000 et 2010.

La figure ci-dessus montre la répartition annuelle des taux de satisfaction globaux de toutes les gestions testées. Nous pouvons remarquer que la gestion 3, représentée en bleu est parmi les plus intéressantes, si ce n'est la meilleure.

En conclusion, nous pouvons dire que la méthode d'utilisation de l'algorithme génétique la plus appropriée et la plus performante est celle qui tient compte de toutes les années et de tous les mois à la fois.

IV.5. Gestion des 40 années par AG

Nous passons dès à présent à la gestion de l'historique par la méthode des algorithmes génétiques. Nous allons employer la méthode de la gestion 3, retenue dans le paragraphe IV.4. La gestion se fera sur 40 années, avec une seule exécution de l'algorithme génétique.

La taille de population choisie est égale à 400 individus, et le nombre de générations est de 5000. Les résultats des taux de satisfactions annuels sont représentés dans la figure suivante :

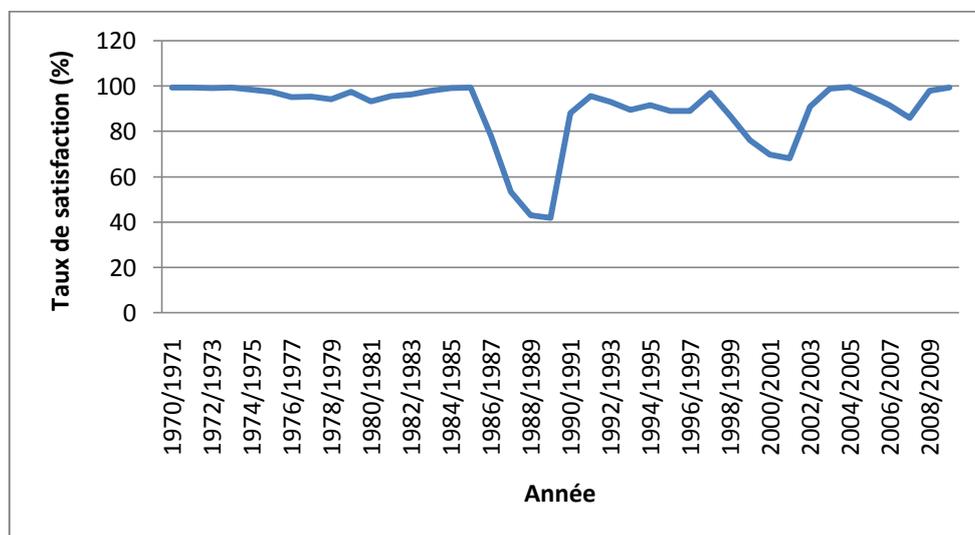


Figure n° IV-8 : Taux de satisfaction annuel de la gestion de l'historique par AG pour les trois secteurs confondus.

Avec un taux de satisfaction global de la gestion égal à 85.8%, nous pouvons dire que la gestion est très satisfaisante. Nous remarquons toutefois des baisses du taux de satisfactions aux même périodes que l'historique et la gestion manuelle, ce qui confirme le fait que quelque soit la gestion, on ne pouvait avoir des taux de satisfaction importants en ces périodes.

Mais lorsque nous comparons les taux de satisfaction annuels de toutes les gestions (Figure n° IV-8), nous remarquons que les algorithmes génétiques parviennent à minimiser les déficits lors des périodes de grandes sécheresses.

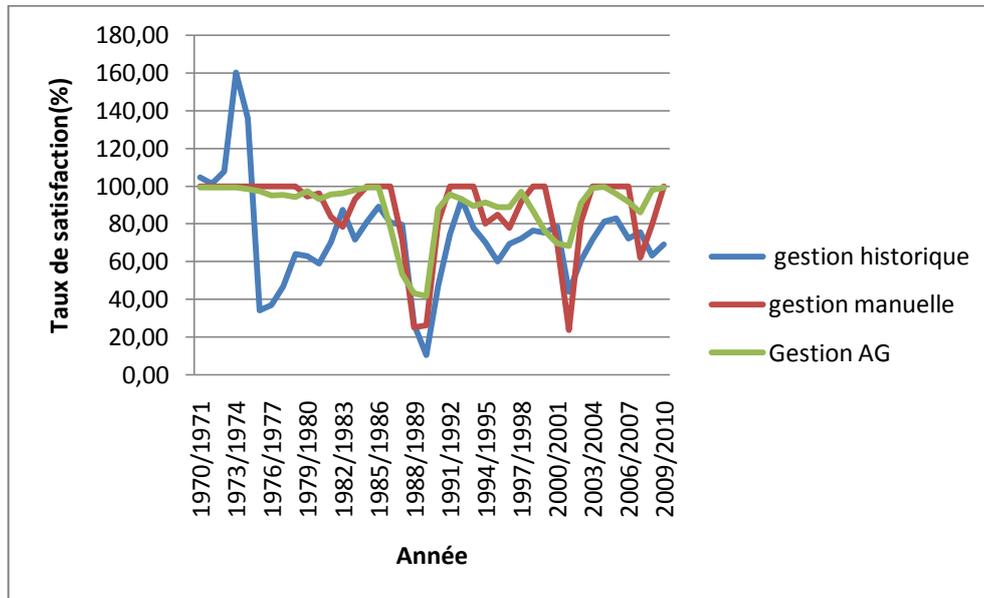


Figure n° IV-9 : Taux de satisfaction annuel global des trois gestions (Réelle, rationnelle et par AG)

En réalité, nous savons bien que la quantité d'eau apportée au barrage reste la même, pour n'importe quelle gestion, mais si les algorithmes génétiques ont donné de meilleurs résultats, c'est parce qu'ils arrivent à anticiper les périodes de sécheresse ; ainsi, les pics de déficit des AG sont nettement moins importants que ceux de la gestion manuelle.

En outre, alors que la gestion manuelle donne des taux de satisfaction maximums pour les années précédant les périodes de sécheresse, les algorithmes génétiques commencent déjà à engendrer un léger déficit de manière à garder de l'eau dans la réserve pour les périodes à venir, et à minimiser l'impact de la sécheresse à l'aval.

Lorsque nous analysons les probabilités des dotations totales, nous remarquons que seulement 7.5% des dotations sont considérées comme faibles, 83% comme bonnes et 10% sont moyennes.

Tableau n° IV-10 : Probabilités des dotations annuelles des trois secteurs confondus pour l'historique

Probabilités des Lachers Totaux			AG
Bonne	P1	>82	0.825
Moyenne	P2	[57 82]	0.1
Faible	P3	< 57	0.075

Afin d'obtenir les allocations mensuelles de chaque secteur, un dispatching à la main a été fait.

Tableau n° IV-11 : Probabilités des dotations annuelles de chaque secteur pour l'historique.

Bonne	P11	>32	0.9
Moyenne	P12	[24,32]	0.075
Faible	P13	[0,24]	0.025
Bonne	P21	>10	0.8
Moyenne	P22	[8,10]	0.15
Faible	P23	<8	0.05
Bonne	P31	>40	0.8
Moyenne	P32	[25,40]	0.125
Faible	P33	<25	0.075

Pour ce qui est des pénalités annuelles de chaque secteur (Tableau n° : IV-10), on remarque que les plus grands pourcentages des dotations sont situés dans la tranche des bonnes satisfactions, avec 90% pour l'AEP, 80% pour l'AEI et 80% pour l'irrigation. Et la tranche des faibles dotations est celle qui contient le moins de valeurs.

Tableau n° IV-12 : Comparaison des probabilités des dotations annuelles de chaque secteur pour les trois gestions.

Pénalités des Lachers Totaux			Historique	manuelle	AG
bonne	P11	>82	0.3077	0.825	0.825
Moyenne	P12	[57 82]	0.5128	0.075	0.1
Faible	P13	< 57	0.1795	0.1	0.075

Ainsi, en comparant les trois gestions en termes de pénalités annuelles globales (Tableau n° IV-11), nous remarquons qu'au cours de la gestion réelle, la probabilité d'avoir de bons taux de satisfaction sont très faibles, alors que les deux gestions (manuelle et par AG) parviennent à augmenter cette probabilité de 42%, ce qui n'est pas négligeable.

L'analyse en composante principales sur les paramètres de la dernière gestion a donné le cercle de corrélation de la CP1' et la CP2' :

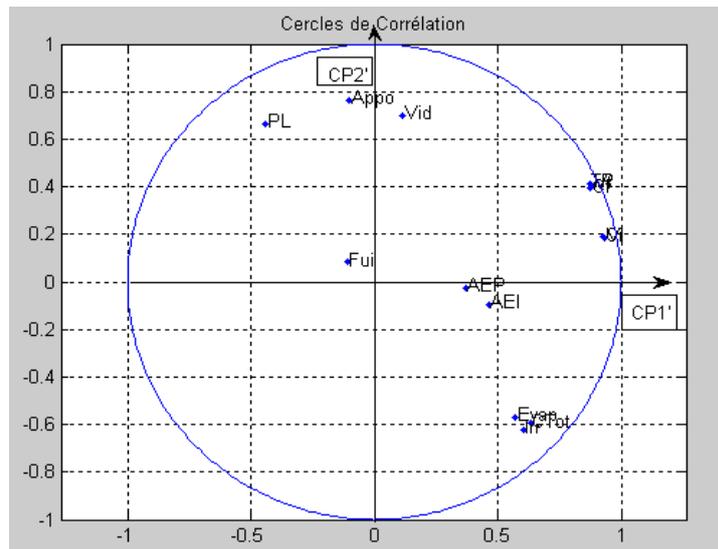


Figure n° IV-10 : Cercle de corrélation de la CP1' et CP2' pour la gestion par AG

Nous remarquons la formation du groupe d'AEP et d'AEI, traduisant ainsi le fait que la priorité a été donnée à ces deux secteurs. L'irrigation quant à elle est corrélée avec la consommation totale et l'évaporation. Le reste des cercles est représenté dans l'annexe I. Les résultats de la gestion sont quant à eux représentés en annexe II.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a permis l'élaboration d'un programme d'Algorithme Génétique.

Pour s'assurer de ce dernier, nous avons aussi utilisé la Toolbox de Matlab, qui contient les opérateurs de l'algorithme génétique préprogrammés. La comparaison a été faite pour une année sèche et une année humide. Les deux algorithmes se comportent de la même manière et les résultats sont très proches.

En analysant les différences entre les trois gestions, nous remarquons que la puissance des algorithmes génétiques est le balayage réfléchi de l'espace de recherche. Ainsi, en peu de temps, ils arrivent à trouver les solutions optimales permettant de minimiser les déficits aux périodes sèches en diminuant de peu les dotations dans les périodes humides.

CHAPITRE V : SIMULATION ET OPTIMISATION FUTURES

V.1. Introduction

Après avoir élaboré le modèle de gestion, nous nous sommes attelés à gérer le barrage dans le futur. Pour ce faire, nous avons simulé les apports sur 50 années afin de développer des scénarii parmi lesquels nous avons retenu celui qui représente en fait, une situation de sécheresse défavorable pour lui appliquer le modèle des algorithmes génétiques élaboré afin d'apprécier ses performances. Nous avons élaboré un modèle markovien multi classes pour simuler les pluies et utilisé un modèle conceptuel pluie-débit GR2M pour la simulation des apports.

V.2. Nécessité d'utilisation d'un modèle de simulation

Les modèles de simulation sont utilisés pour reproduire des phénomènes, ou pour prévoir des comportements d'un système soumis à une sollicitation donnée. L'évolution au cours du temps des phénomènes où intervient le hasard sont bien représentés par des modèles aléatoires. Le résultat d'observations des pluies ou des apports n'est qu'une suite de valeurs liées traduisant ainsi une certaine corrélation existante entre elles.

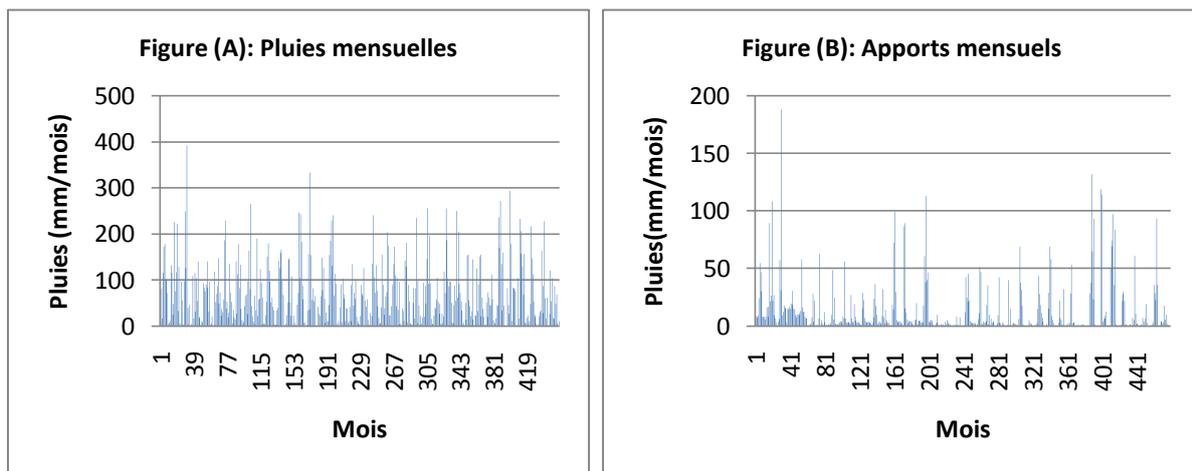


Figure n° V-1: Représentation de l'évolution des paramètres hydrologiques dans le temps.

D'après le graphe ci-dessus, les représentations de l'évolution des pluies et des apports mensuels dans le temps montrent clairement le caractère aléatoire de ces deux paramètres. Par conséquent, il est important de passer par un modèle stochastique basé sur un calcul de probabilités afin de tenir compte de cet aléa. Parmi les modèles existants, nous pouvons citer

les chaînes de Markov ; en effet, ces derniers permettent de générer des séries synthétiques de n'importe quelle variable aléatoire.

V.3. Théorie sur la modélisation par les chaînes de Markov

V.3.1. Introduction

La chaîne de Markov est un processus dont les probabilités de transition sont conditionnelles au passé. Le concept de chaîne de Markov est attribué au mathématicien russe Andrej Andreevic Markov, vers 1907. La théorie a en suite été développée notamment par Hostinsky, Von Mises, Fréchet, Bernstein, Romanovsky, Kolmogorov, Dinkin (1965) et Keneny & Snell (1976). De nombreuses applications ont été réalisées dans de nombreux domaines tels que la physique, la biologie la chimie ou encore l'hydrologie. [Berchtold, A., (1998)].

Selon Vallois, P. (2007), les chaînes de Markov jouent un rôle important dans la modélisation des phénomènes d'évolution temporelle avec mémoire. Il précise aussi qu'une chaîne de Markov est un processus aléatoire qui ne retient du passé que l'instant présent. Une chaîne de Markov met en relation des observations successives d'une même variable. C'est un système qui peut évoluer entre n états E_i définis par le repère $E = (E_1, E_2, \dots, E_n)$.

Le passage d'un état E_i à un état E_j ou « transition », ne dépend que des deux états et s'effectue selon la probabilité conditionnelle suivante : $\text{Prob}(E_j/E_i) = P_{ij}$ (Probabilité de se trouver dans l'état E_j en fin de transition en étant dans l'état initial E_i). Une chaîne de Markov est caractérisée par une matrice stochastique dite : « Matrice de transition » :

$$M = [P_{ij}] \text{ avec : } \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, \quad i=1 \text{ à } n \quad \text{et} \quad 0 \leq P_{ij} \leq 1$$

Les chaînes de Markov peuvent être utilisées dans la simulation des paramètres climatologiques qui suivent un processus aléatoire. Les séries chronologiques d'événements aléatoires sont caractérisées par des variables qui peuvent être discrètes ou continues. Une variable est dite discrète si elle résulte d'un comptage. Par exemple, le fait de pleuvoir ou non est une variable discrète.

En revanche, une variable est dite continue si elle est représentée par des valeurs mesurées. Nous pouvons citer par exemple les débits, les pluies, la température, au pas de temps journalier. Dans une série chronologique d'événements aléatoires caractérisée par une

variable aléatoire continue, nous cherchons souvent une relation entre les valeurs successives de celle-ci : Si l'état d'un jour k dépend de celui des jours précédents, nous diront que le phénomène étudié suit une chaîne de Markov. Celle-ci sera du premier ordre si l'événement du jour k ne dépend que du jour précédent. Elle sera du $n^{\text{ième}}$ ordre si ce même événement dépend des jours $k-1, k-2, \dots, k-n$.

V.3.2. Les modèles binaires

Selon Bermad (1990), leur principe est basé sur l'existence de deux états :

- ✓ *Etat 0* : représente le jour où la variable est nulle ou inférieure à un seuil.
- ✓ *Etat 1* : représente le jour où la variable est supérieure au seuil fixé.

Ce seuil est choisi en fonction du climat étudié et peut être très subjectif ; il pourra ainsi dépendre de l'objectif de la simulation, et de la personne qui simule.

V.3.2. 1. Les modèles d'ordre 0

Ce modèle ne tient compte que de l'évènement lui-même ; L'influence des jours précédents est donc considérée comme étant nulle. La matrice de passage est obtenue par simple comptage de la série chronologique.

V.3.2.2. Les modèles d'ordre 1

Le processus d'ordre 1 est caractérisé par les probabilités conditionnelles de passage de l'état de la veille à l'état d'aujourd'hui ; c'est-à-dire qu'on ne tient compte que des évènements qui se sont produits la veille.

Soient X la variable aléatoire qui caractérise l'état (ie : $X=0$ ou 1) et X_k , la valeur du jour k . Soit i l'état réalisé le jour $k-1$; la probabilité conditionnelle est la probabilité de l'état j au jour k sachant qu'était réalisé l'état i au jour $k-1$.

$$\text{Prob } \{X_k=j / X_{k-1}=i\} = \alpha_{ij}$$

Avec deux états, nous aurons quatre possibilités :

Etat au jour k-1	Etats au jour k	
	0	1
0	α_{00}	α_{01}
1	α_{10}	α_{11}

Avec : $\alpha_{00+} \alpha_{01}$ et $\alpha_{10+} \alpha_{11}=1$

Ces coefficients sont obtenus par le décompte des jours caractérisés par les états (i , j). Si la matrice de transition d'ordre 1 élevée à l'exposant n converge à l'infini vers une matrice asymptotique (c'est-à-dire qu'à partir d'un certain temps, les probabilités conditionnelles deviennent indépendantes de l'état initial) alors, nous diront que n représente la mémoire météorologique du phénomène. Celle-ci fixe l'ordre maximum des chaînes de Markov.

V.3.3. Les modèles multi classes

Au lieu d'utiliser un système binaire qui peut être dans certains cas inconvenables à la simulation, nous étudieront un modèle markovien multi-classes qui, comme son nom l'indique consiste à subdiviser la série historique en plusieurs classes. Dans ce cadre là, nous transformons l'état (système binaire) en classes (système multi-classes), le problème qui se posera est le choix des seuils de ces classes.

V.3.3.1. Modèles d'ordre 1

En appliquant le modèle multi-classes à une série de données allant de 0 à N, et en prenant quatre classes par exemple, nous aurons :

Classe 1 : [0-A] Classe2 : [A-B] Classe3 : [B-C] Classe4 : [C-D]

Remarque : La dernière classe comprendra forcément la valeur maximale de la série étudiée.

En considérant l'ordre 1 des chaînes de Markov, nous aurons la matrice de passage suivante :

	Classe1	Classe2	Classe3	Classe4
Classe1	α_{11}	α_{12}	α_{13}	α_{14}
Classe2	α_{21}	α_{22}	α_{23}	α_{24}
Classe3	α_{31}	α_{32}	α_{33}	α_{34}
Classe4	α_{41}	α_{42}	α_{43}	α_{44}

En augmentant l'ordre des chaînes de Markov, le nombre de coefficient augmente exponentiellement et la matrice devient très vite, très grande. Pour un processus Markovien multi-classes d'ordre r constitué de n classes, la matrice de transition obtenue dans ce cas est carrée et aura pour dimension $n^r \times n^r$. Le découpage en classes peut se faire de différentes manières, mais doit tenir compte du phénomène physique. Il peut ainsi se faire aléatoirement :

- ✓ On choisit les seuils et on suit l'évolution des coefficients de la matrice de passage ;
- ✓ En utilisant les équiprobabilités dans la fonction de répartition de la série historique ;
- ✓ En se basant sur la moyenne et l'écart type de la série historique ; on procède au découpage à l'aide des seuils suivants :

$$[\text{Moyenne}(X) - \text{Ecart Type}(X) \quad , \quad \text{Moyenne}(X) + \text{Ecart Type}(X)]$$

$$[\text{Moyenne}(X) - 2 \times \text{Ecart Type}(X) \quad , \quad \text{Moyenne}(X) + 2 \times \text{Ecart Type}(X)]$$

$$[\text{Moyenne}(X) - 3 \times \text{Ecart Type}(X) \quad , \quad \text{Moyenne}(X) + 3 \times \text{Ecart Type}(X)]$$

Avec : X la Variable aléatoire étudiée.

La difficulté du choix des seuils augmente avec l'augmentation du nombre de classes. Cependant, l'utilisation d'un nombre élevé de classes permet le passage d'un modèle discret à un modèle continu, le problème sera l'homogénéité du nombre de valeurs dans chaque classe.

V.3.4. Phénomène saisonnier

Vu la disparité des saisons, il est indispensable de scinder l'année en saisons afin d'affiner l'étude et de ressortir les caractéristiques de chaque saison pour que le modèle mathématique soit le plus prêt possible du phénomène physique. Chaque saison aura ainsi sa matrice de transition, et la simulation se fera saison par saison. La série synthétique se composera ainsi des différentes séries obtenues pour chaque saison.

V.3.5. Simulation par les modèles multi-classes

Le principe est sensiblement le même que dans le cas binaire. Disposant des probabilités conditionnelles cumulées, nous effectuons un tirage d'un nombre aléatoire entre 0 et 1. Le résultat obtenu sera comparé aux seuils des fréquences conditionnelles cumulées et indiquera la classe au jour j , connaissant la classe du jour i réalisée la veille, la classe initiale étant fixée arbitrairement, ou aléatoirement (celle-ci n'a pas une grande importance étant donné que la mémoire du phénomène est courte).

Si le nombre aléatoire tiré est inférieur au seuil de fréquence α_{i1} , l'état simulé est doté de la classe 1, sinon, nous lui attribuons la classe correspondante. Si nous prenons l'exemple précédent, avec 4 classes, en se fixant pour classe initiale la classe 1, les seuils de probabilités conditionnelles cumulés s'écrivent comme suit :

- ✓ Classe 1 : de 0.000 à α_{11}
- ✓ Classe 2 : de α_{11} à $\alpha_{11} + \alpha_{12}$
- ✓ Classe 3 : de $\alpha_{11} + \alpha_{12}$ à $\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13}$
- ✓ Classe 4 : de $\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13}$ à $\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{14}$

On fait un premier tirage d'un nombre aléatoire compris entre 0 et 1. Le résultat obtenu sera comparé aux probabilités conditionnelles cumulées ce qui permettra de placer l'état simulé dans la classe correspondante. Cet état simulé servira de classe initiale pour la simulation suivante.

Pour déterminer les valeurs simulées d'une classe, on trace la fonction de répartition de la variable historique, appartenant à cette classe et qui suivent généralement la loi normale. On fait un second tirage d'un nombre aléatoire pris entre 0 et 1 ; Le résultat obtenu sera projeté sur la fonction de répartition, ce qui permettra de déterminer la valeur simulée du débit.

V.3.6. Comparaison entre série historique et simulée

Pour étudier la fiabilité du modèle, et afin d'accepter ou de rejeter une simulation, nous pouvons vérifier que :

- a. Les moyennes et écarts types mensuels interannuels de la série simulée appartiennent à l'intervalle de confiance des moyennes et écarts types mensuels interannuels de la série historique ;
- b. La moyenne des variables annuelles simulées et leurs écarts types appartiennent à l'intervalle de confiance de la moyenne et de l'écart type des variables historiques.

Il faudrait que 24 de ces 26 conditions soient vérifiées.

V.4. Simulation des apports

Les processus de génération des apports sont nombreux et variables selon les bassins et les climats. Parmi les facteurs engendrant une réponse du bassin versant figurent les apports des précipitations, aussi bien en termes d'intensité, de durée que de fréquence. Aussi, l'apport d'énergie radiative ou advective peut jouer un grand rôle dans la redistribution de l'eau dans les sols en influant sur l'évapotranspiration, et il en est de même pour l'état hydrique et hydrologique initial du bassin, contrôlé par les périodes pluvieuses et sèches précédentes.

Aussi, la variabilité dans l'espace et dans le temps de la pédologie et du couvert végétal a un rôle direct sur l'interception, sur l'infiltration et le ruissellement. Enfin la dynamique des crues est fortement influencée par la topographie et la morphométrie du bassin versant.

Autant de facteurs qui, par leur caractère concomitant font de ce phénomène de génération des apports un phénomène aussi complexe que difficilement maîtrisable par les hydrologues.

Cependant, une multitude de travaux a été effectuée dans le domaine, et de nombreux modèles ont été établis afin de répondre à la demande croissante, telle que l'extrapolation des séries de apports, ou encore la simulation, cas traité dans ce travail.

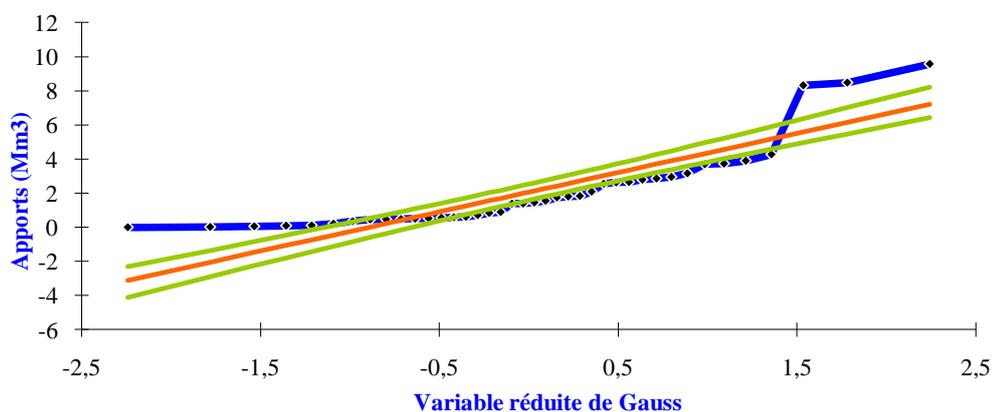


Figure V-2 : Ajustement des apports mensuels du mois de Septembre à la loi Normale.

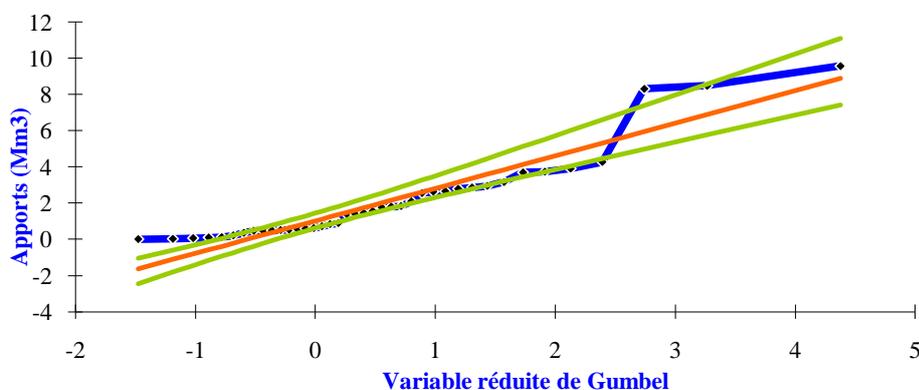


Figure V-3 : Ajustement des apports mensuels du mois de Septembre à la loi de Gumbel.

Nous sommes dans l'impossibilité de les simuler par les chaînes de Markov. La nécessité de passer par un modèle conceptuel « Pluie-débit » s'est fait sentir, et le modèle choisi fut le modèle GR2M, développé par Mouelhi (2003) et Moulehi et al. (2006).

V.4.1. Utilisation du modèle GR2M

Le logiciel, disponible sur internet et utilisé à des fins pédagogiques permet de faire des simulations de débit au pas de temps mensuel à l'aide du modèle GR2M ; les explications sont représentées dans l'image suivante :

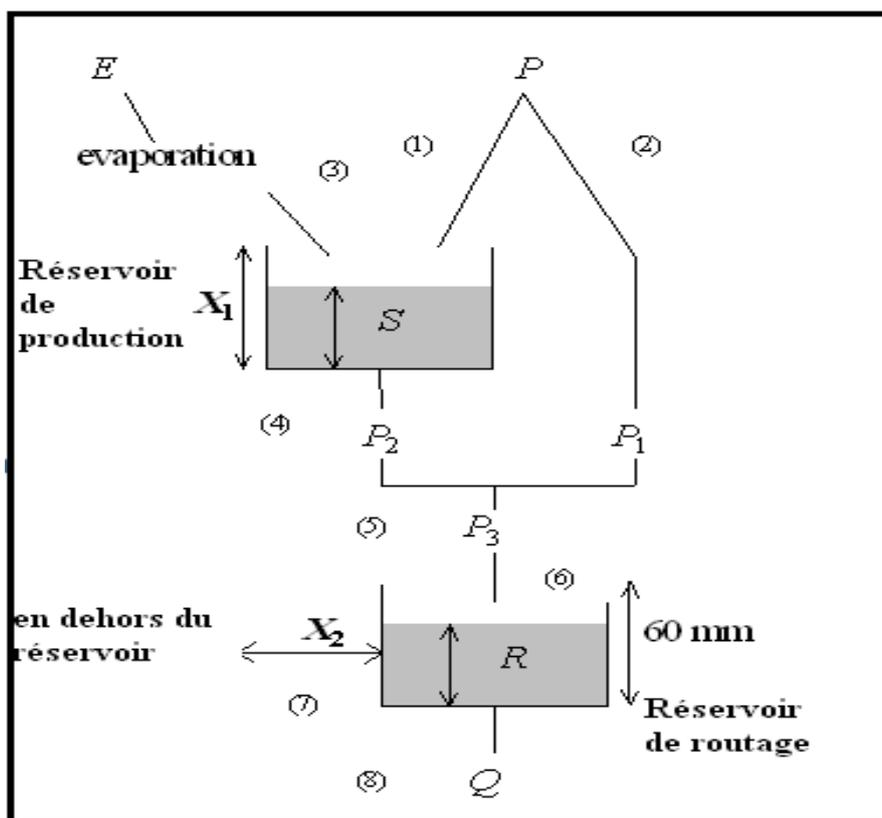


Figure n° V-4 : Représentation des étapes du modèle (Source : Moulehi et al. (2006))

Les étapes sont expliquées par les équations ci-dessous :

En premier lieu, le niveau du réservoir sol S devient S1

$$(1) \quad S_1 = \frac{S + X_1 \times \psi}{1 + \psi \frac{S}{X_1}} \quad \text{Avec : } \psi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right)$$

Une partie des pluies P1 va contribuer à l'écoulement :

$$(2) \quad P1=P+S-S1$$

Le niveau du réservoir est encore modifié sous l'effet de l'évapotranspiration potentielle, et il sera égal à S2 :

$$(3) \quad S2 = \frac{P2=S2-S}{1 + \varnothing \left(1 - \frac{S1}{X1}\right)} \quad \text{Avec : } \varnothing = \tanh\left(\frac{E}{X1}\right)$$

$$(4) \quad S = \frac{S2}{\left(1 + \left(\frac{S2}{X1}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}}$$

Le deuxième réservoir reçoit une quantité de pluie P3 :

$$(5) \quad P3=P1+S2$$

La quantité d'eau dans le réservoir R deviendra R1:

$$(6) \quad R1=R+P3$$

La nouvelle quantité d'eau dans le réservoir sera égale à R2 qui est fonction du coefficient d'échange :

$$(7) \quad R2=X2 \times R1$$

Le débit sera donc écrit sous la forme :

$$(8) \quad Q = \frac{R^2}{R2+60}$$

La quantité réelle d'eau dans le réservoir de routage est donc :

$$R=R2-Q$$

Avec :

P : Pluies précipitée

E : Evaporation

S : Quantité initiale d'eau dans le réservoir de production

X1 : capacité du réservoir de production

X2 : paramètre d'échange

V.4.1.1. Critère de validation du modèle

Pour avoir une idée concernant la qualité de la simulation, il faut faire une comparaison entre les données observées et simulées par le modèle. La technique la plus

utilisée est la méthode du double échantillon, qui consiste à caler le modèle sur une période donnée dite de calage ou de calibration, puis de le tester et d'estimer sa performance sur le reste des observations ; cette période sera dite : Période de validation.

Afin d'estimer les écarts entre les données simulées par le modèle, et les données observées, on distingue deux types de critères :

- ✓ **Les critères graphiques** : correspondent à un ajustement graphique des données simulées sur les données observées. Ces critères ne sont pas sans importance, du fait qu'ils permettent un jugement visuel, et donc une appréciation de la qualité du modèle à reproduire les différentes tendances climatiques.
- ✓ **Les critères numériques** : consistent à déterminer une fonction qui va minimiser l'erreur entre les données simulées par le modèle, et celles observées. Dans notre cas, nous allons utiliser le critère graphique, et les trois critères numériques suivants :
 - **Le critère de Nash et Sutcliffe** : Considéré comme la base des critères de performance des modèles pluie-débit. C'est un critère adimensionnel qui exprime le pourcentage de la variance naturelle que l'on gagne par rapport à un modèle de référence qui donnerait comme débits calculés la moyenne des débits observés. Il est défini par :

$$Nash = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{isim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{iobs} - Q_{moy})^2} \right) \cdot 100$$

Avec : Q_{iobs} : Débit observé au mois i

Q_{isim} : Débit simulé au mois i

Q_{moy} : Moyenne des débits observés

On dira que le modèle est acceptable au-delà d'un Nash = 70%

- **Le critère RMSE (Root Mean Squared Error)** : Il est défini comme étant la racine carrée de l'erreur quadratique, l'introduction de la racine carrée a pour but d'homogénéiser les écarts entre les débits simulés et observés en particulier dans les cas extrêmes (débits faibles ou élevés), du fait que cette erreur est élevée au carré dans le cas du critère quadratique. Le critère RMSE est défini comme suit :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (Q_{i\text{obs}} - Q_{i\text{sim}})^2}$$

Avec : $Q_{i\text{obs}}$: Débit simulé au mois i

$Q_{i\text{obs}}$: Débit observé au mois i

Les modèles sont optimisés si les valeurs des critères sont proches de zéro. Cependant les résultats sont fortement influencés par les valeurs importantes des écarts, correspondants souvent aux crues.

- *Coefficient de corrélation* : Il est défini comme suit :

$$R = \frac{(Q_{i\text{obs}} - Q_{\text{moyobs}}) \times (Q_{i\text{sim}} - Q_{\text{moysim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{obs}} - Q_{\text{moyobs}})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q_{i\text{sim}} - Q_{\text{moysim}})^2}}$$

Le calcul de ces critères exclut les résultats sur les n premiers pas de temps réservés pour la mise en route du modèle (l'effet d'une mauvaise initialisation de ses états internes dans le calcul des critères est en fait limité par l'utilisation d'une période de mise en route, que l'on prendra égale à 12 mois).

V.4.1.2. Paramètres du modèle

Les valeurs des paramètres du modèle X1 et X2 peuvent être optimisées en utilisant la fonction "Solveur" d'Excel. La fonction objectif choisie est la maximisation du critère de Nash. En début d'optimisation, on pourra choisir les valeurs initiales suivantes pour les paramètres transformés: X1=6, X2=1

V.4.2. Simulation des pluies

V.4.2.1. Une pluie représentative du bassin versant

Nous avons donc décidé de passer de valeurs ponctuelles à des valeurs moyennes de pluies. Parmi les méthodes généralement proposées pour calculer la moyenne des pluies à partir de l'ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin ou à proximité, on distingue :

V.4.2.1.1. Méthode de la moyenne arithmétique

C'est de loin la méthode la plus simple, mais la moins recommandée car peu représentative. Elle utilise le calcul de la moyenne arithmétique des valeurs obtenues aux stations étudiées. Cette méthode ne s'applique que dans le cas où les stations sont bien réparties et si le relief du bassin versant est homogène, ce qui n'est malheureusement pas notre cas.

V.4.2.1.2. Méthode des polygones de Thiessen

Cette méthode consiste en un calcul de moyenne pondérée : elle améliore la méthode de la moyenne arithmétique, en ce sens qu'elle affecte à chaque station un poids dépendant de la zone d'influence du pluviomètre, dont l'aire affectée d'un pourcentage représente le facteur de pondération de la valeur locale.

Les différentes zones d'influence sont déterminées par découpage géométrique du bassin sur une carte topographique. La précipitation moyenne pondérée P_{moy} du bassin se calcule alors en effectuant la somme des précipitations P_i de chaque station, multipliée par leur facteur de pondération (aire A_i), le tout divisé par la surface totale A du bassin. La précipitation moyenne sur le bassin s'écrit :

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

Avec :

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin ;

A : aire totale du bassin ($=\sum A_i$) ;

P_i : précipitation enregistrée à la station i ;

A_i : superficie du polygone associée à la station i .

Méthodologie de découpage

1. Reporter les stations pluviométriques sur la carte du bassin versant ;
2. Tracer tous les segments de droites reliant les stations adjacentes ;
3. Tracer les médiatrices de chaque segment de droite ;
4. Les polygones sont déterminés par les intersections de ces médiatrices ;

5. Les côtés des polygones et/ou la ligne de partage des eaux représentent les limites de l'aire (et du poids) accordée à chaque station. L'aire de chaque polygone A_i est déterminée par planimétrie ou numériquement.

V.4.2.1.3. Méthode des isohyètes

Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (iso valeurs de pluies annuelles, mensuelles, journalières, etc...). Grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes, on peut tracer le réseau d'isohyètes, qui ne sera pas unique (contrairement aux courbes de niveau). Lorsque les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^K A_i \cdot P_i}{A}, \quad \text{avec} \quad P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Avec : P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin,

A : surface totale du bassin,

A_i : surface entre deux isohyètes i et $i+1$,

K : nombre total d'isohyètes,

P_i : moyenne des hauteurs h de précipitations entre deux isohyètes i et $i+1$.

Dans le cas de notre étude, comme il est pratiquement impossible d'utiliser la méthode des isohyètes pour la détermination d'une pluie représentative, nous avons opté pour l'emploi de la moyenne pondérée par la méthode des polygones de Thiessen. La détermination des facteurs de pondération a été effectuée sur Autocad. Et nous pouvons voir, sur la figure suivante, les surfaces délimitées.

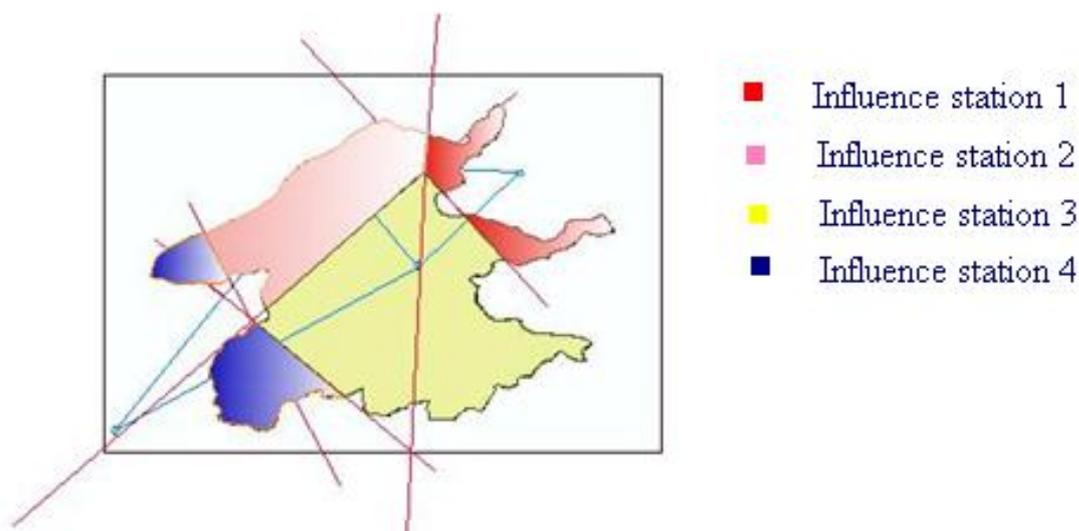


Figure n° V-5 : Représentation des zones d'influence des stations pluviométriques

Les résultats des coefficients de pondération sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau n°V-1: Coefficient de pondération des pluies des stations pluviométrique considérée

Station	Nom	Pondération
Station 1	AIN KERMA	0.0810
Station 2	Pluvio barrage	0.2428
Station 3	Bouhadjar	0.5426
Station 4	Mechrouha	0.1329

Ainsi, nous avons obtenu la pluie pondérée du bassin versant, depuis Septembre 1970 jusqu'en Août 2008, que nous considérerons comme pluie représentative.

V.4.2.2 Application du modèle GR2M sur la pluie pondérée

Dans un premier temps, nous avons considéré la moyenne pondérée des quatre stations comme étant une pluie représentative du bassin versant. Nous avons en tout 336 valeurs de pluies mensuelles, dont 226 pour le calage, et 110 pour la validation. Grâce à l'utilisation du Solver d'Excel, nous avons obtenu les paramètres optimisés du modèle, qui sont représentés dans le tableau suivants :

Tableau n° V-2 : Paramètres du modèle GR2M appliqué sur les pluies pondérées.

Paramètres du modèle	
x1 : Capacité rés. production (mm)	5.47
x2 : Paramètre d'échange (mm)	0.90

Les débits simulés durant la période de calage, ainsi que la période de validation sont représentés respectivement dans les deux figures suivantes :

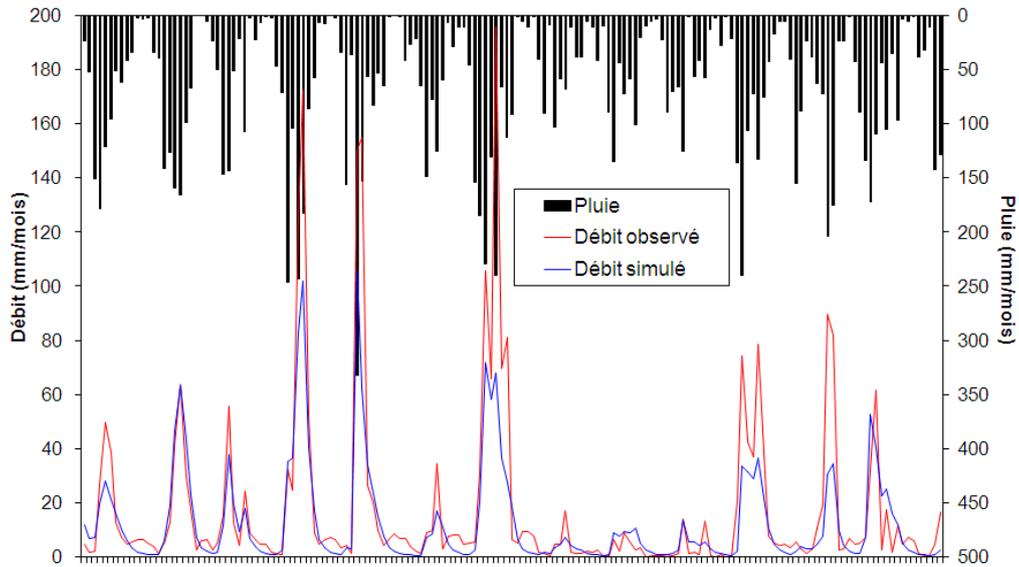


Figure n° V-6 : Calage des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M

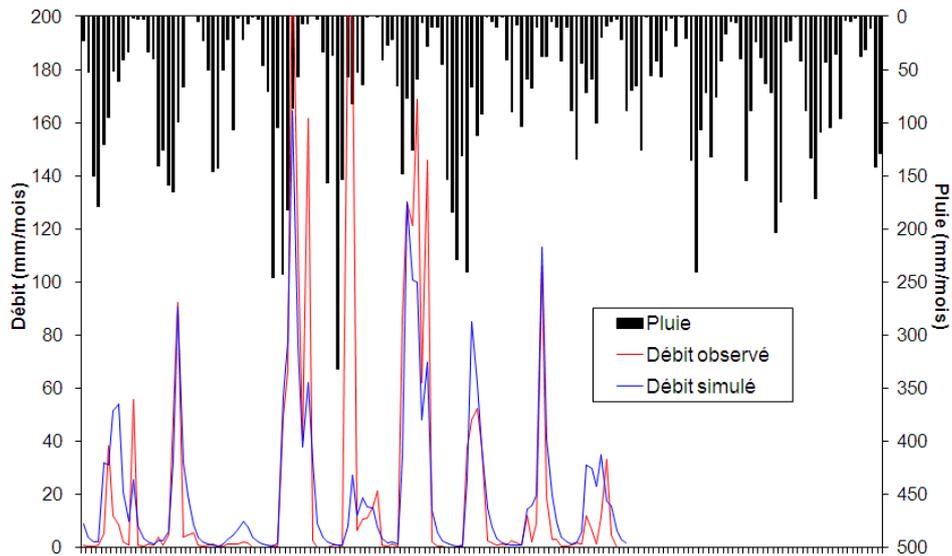


Figure n° V-7 : Validation des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M

Nous remarquons que les débits simulés reproduisent fidèlement l'évolution des débits historiques pour les deux périodes de calage et de validation mais qu'ils ne parviennent pas à reproduire les débits max de l'historique, le résultat graphique n'est donc pas satisfaisant.

Les critères numériques représentés dans le tableau suivant confirment le fait que la simulation des débits par le biais de ce modèle n'est pas satisfaisante. En effet, avec un critère de Nash inférieur à 70% en période de calage et de validation, on ne peut pas dire que le modèle soit bien adapté à cette simulation. Il en est de même pour le critère RMSE.

Tableau n° V-3 : Critères numériques de validation du modèle GR2M utilisant la pluie pondérée.

	Calage	Validation
Nash	42.9	56.7
RMSE	5.4	5.1
Coeff. Correl	0.66	0.75

De plus, les deux graphes suivants, qui représentent respectivement la corrélation entre débits simulés et observés en période de calage et de validation viennent conforter le résultat.

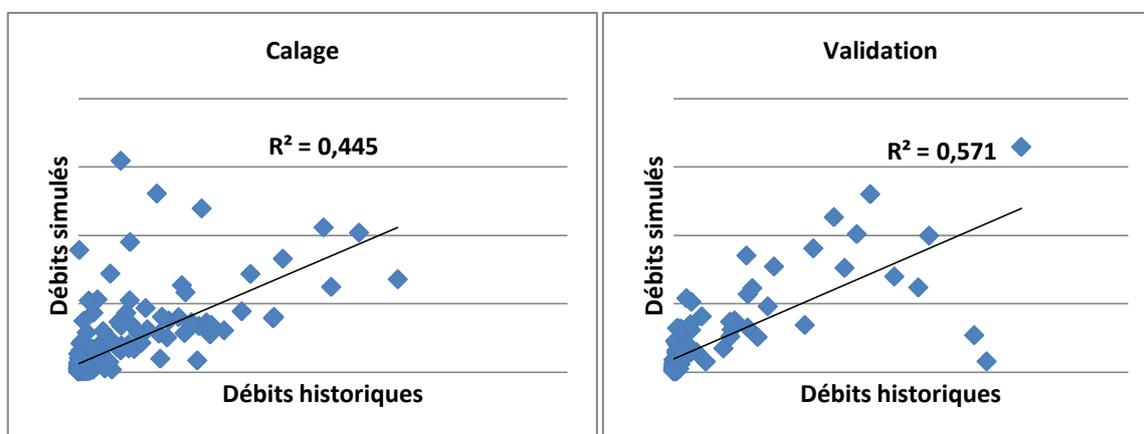


Figure n° V-8: Corrélations entre débits observés et débits simulés issus du modèle GR2M utilisant la pluie pondérée.

A l'issue de cette étape, et en tenant compte des résultats insuffisants obtenus, nous avons cherché à connaître la cause de la non reproduction des débits : est-ce un problème résultant du modèle directement, ou un problème de pluies représentatives ?

Nous avons décidé de changer de pluie, mais le choix de la nouvelle pluie se fera par le biais d'une étude des corrélations entre les débits historiques, et les pluies des quatre stations, leur moyennes pondérées et arithmétiques. Les résultats de chaque corrélation sont représentés dans les figures suivantes :

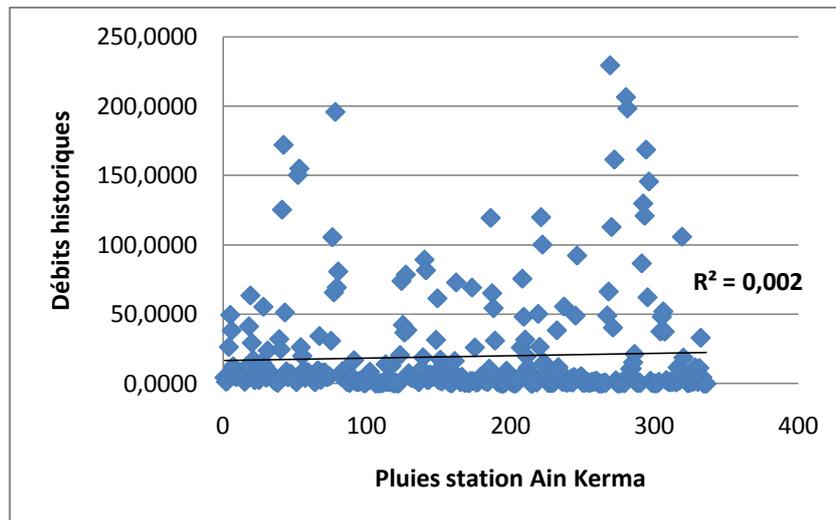


Figure n° V-9 : Corrélation des pluies de la station d'Ain Kerma aux apports historiques

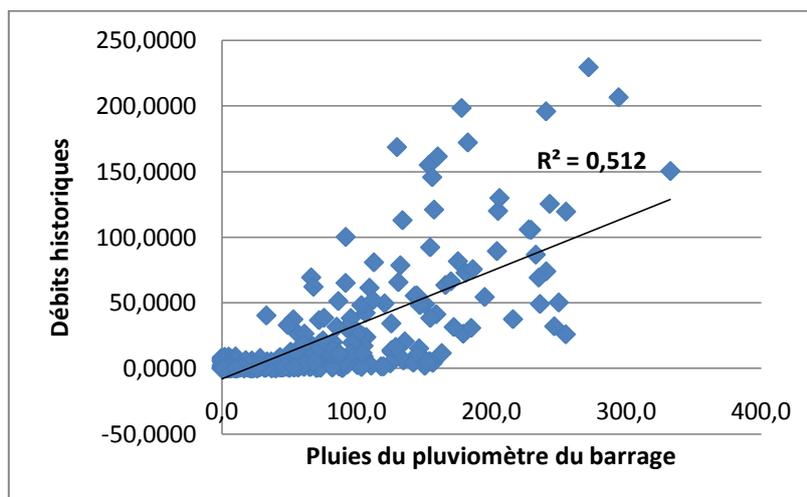


Figure n° V-10 : Corrélation des pluies du pluviomètre barrage aux apports historique.

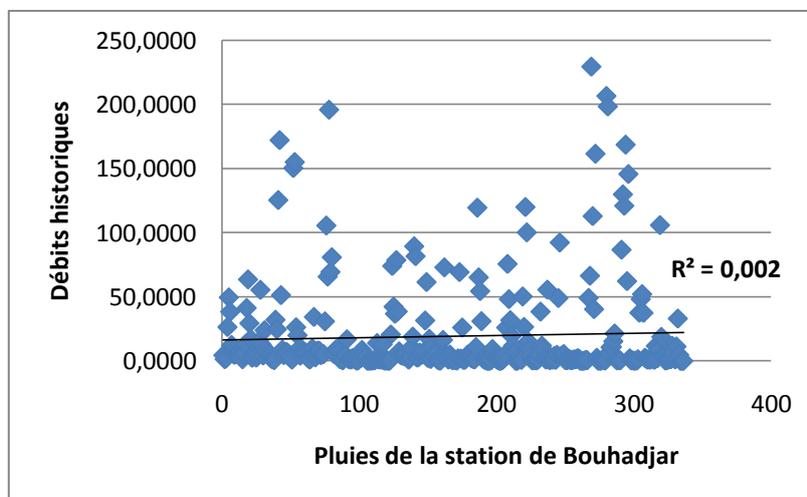


Figure n° V-11 : Corrélation des pluies de la station de Bouhadjar aux apports historiques

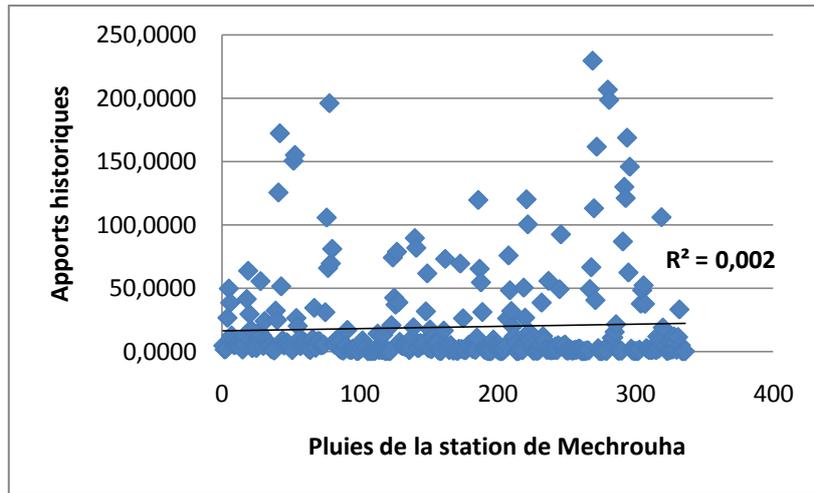


Figure n° V-12 : Corrélation des pluies de la station de Mechrouha aux apports historiques

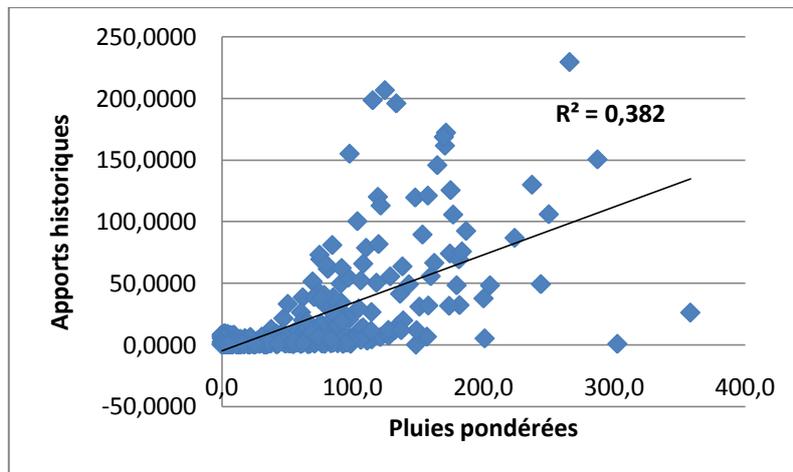


Figure n° V-13 : Corrélation de la moyenne pondérée des pluies aux apports historiques

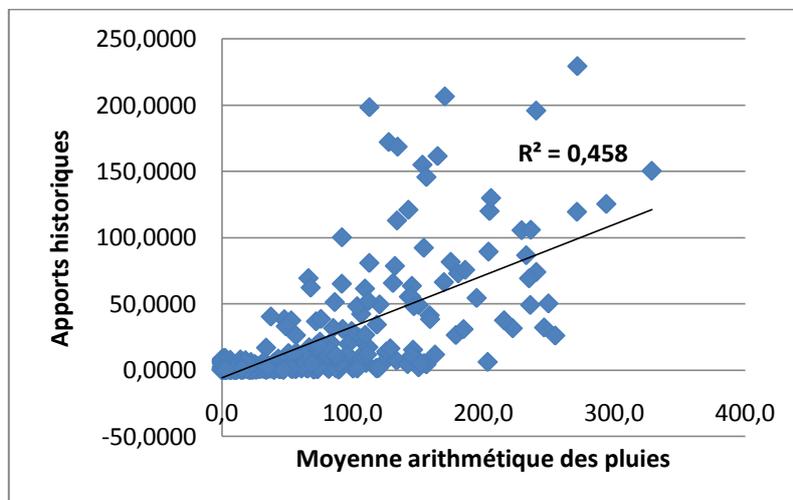


Figure n° V-14 : Corrélation de la moyenne arithmétique des pluies aux apports historiques

Les coefficients de détermination et de corrélation sont résumés dans le tableau ci-dessous, où nous pouvons relever que la station du pluviomètre du barrage, avec un coefficient de corrélation de 0.716 est celle qui pourrait le mieux représenter les pluies.

Aussi, la méthode de la moyenne pondérée n'est pas forcément la mieux adaptée étant donné que la moyenne arithmétique a donné une meilleure corrélation. Ceci serait peut être dû à des problèmes de données dans des stations où le coefficient de pondération serait le plus grand : ainsi, les erreurs auraient été amplifiées.

Tableau n° V-4 : Coefficients de déterminations et de corrélations entre débits et pluies observés de chaque station.

	St. Ain Kerma	Pluvio.barrage	St.Bouhadjar	St.Mechroha	Moy pond	Moy arith
R²	0.002	0.512	0.002	0.002	0.382	0.458
r	0.045	0.716	0.045	0.045	0.618	0.677

En résumé, et en tenant compte des coefficients de corrélation ainsi que des graphiques précédents, nous pouvons dire que les pluies les mieux corrélées aux débits sont celles issues des mesures prises dans la station du barrage de la Cheffia.

V.4.2.3. Application du modèle GR2M sur la pluie du pluviomètre du barrage

Après calage du modèle GR2M sur les pluies du pluviomètre du barrage, et optimisation des paramètres avec l'outil Solver d'Excel, nous avons obtenu les paramètres suivants :

Tableau n° V-5 : Paramètres du modèle GR2M appliqué sur les pluies du pluviomètre du barrage.

Paramètres du modèle	
x1 : Capacité rés. production (mm)	5.72
x2 : Paramètre d'échange (mm)	0.93

Par le biais des figures suivantes, nous remarquons une nette amélioration du modèle ; En effet, que ce soit en période de calage ou de validation, les débits sont relativement bien reproduits même si le problème de la simulation des débits max de l'historique persiste toujours mais l'écart n'est pas aussi important que lors de la simulation par la pluie pondérée.

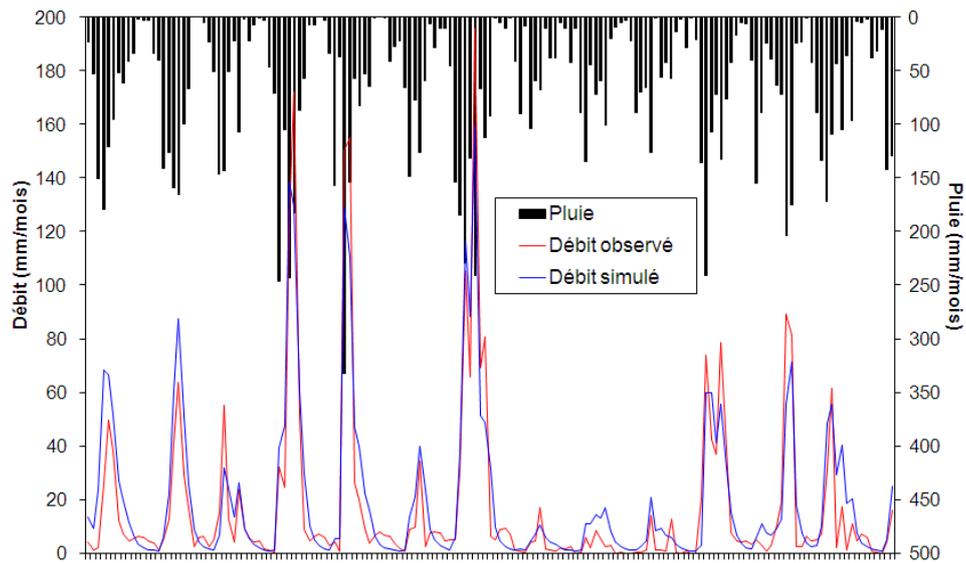


Figure n ° V-15 : Calage des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.

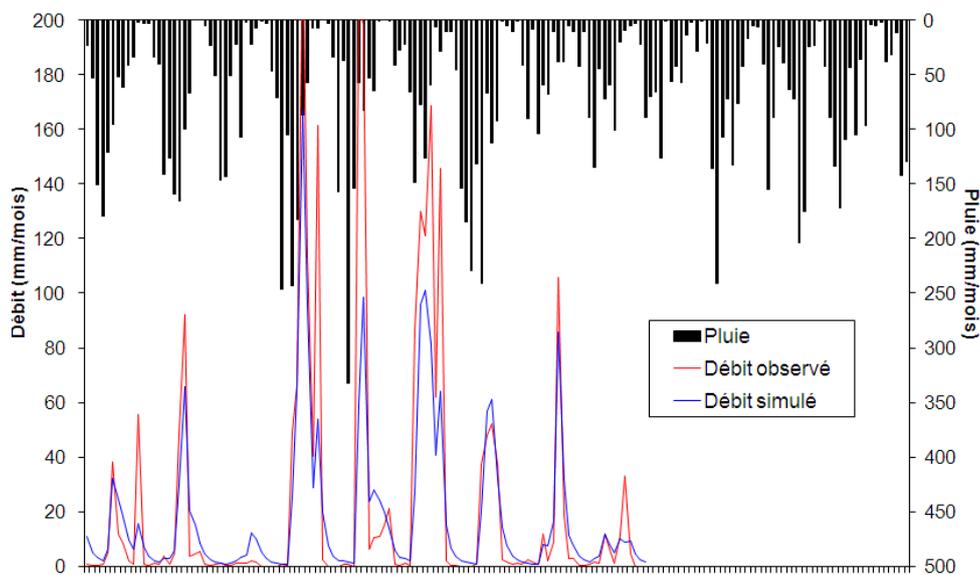


Figure n ° V-16 : Validation des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.

Par contre, dans ce cas les critères de Nash pour les deux périodes sont satisfaisants ; en effet, ce critère atteint presque 89% en période de calage, et dépasse les 70% en période de validation, même si le RMSE reste élevé. Les coefficients de corrélations (figure V-16) entre débits observés et simulés sont très satisfaisants ; Ils dépassent ainsi les 90% pour les deux périodes, on ne donc pas peut réfuter les résultats de ce modèle.

Tableau n° V-6 : Critères numériques de validation du modèle GR2M utilisant les pluies du pluviomètre du barrage.

	Calage	Validation
Nash	88.71	70.23
RMSE	2.5	5.8
Coef. Correlation	0.9	0.9

Les corrélations entre débits simulés et observés durant les deux périodes de calage et de validation sont représentées ci-dessous.

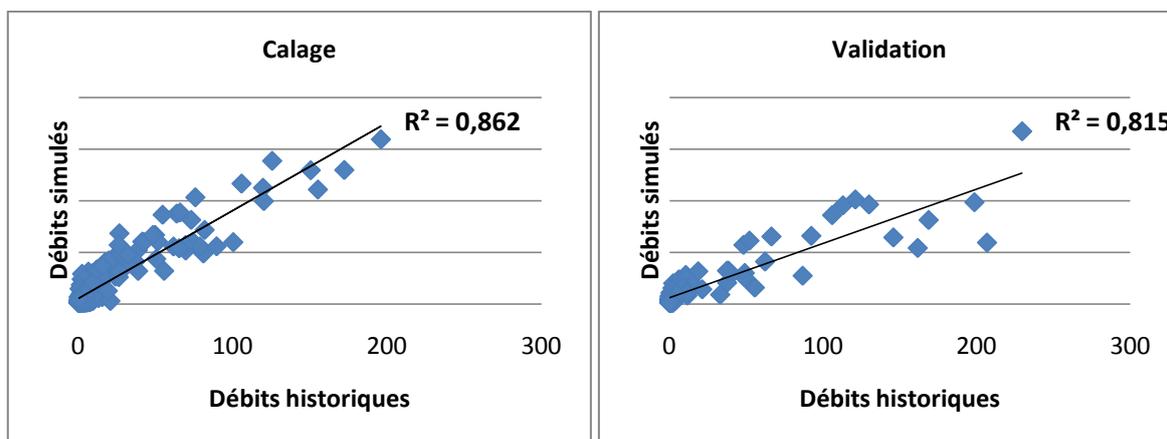


Figure n° V-17 : Corrélation entre débits historiques et simulés par le modèle GR2M appliqué au pluviomètre du barrage.

Les résultats de la simulation des débits par le biais du modèle GR2M appliqué aux pluies du pluviomètre du barrage sont satisfaisants, ce qui prouve que le problème ne résidait pas dans le modèle lui-même, mais bien dans le choix de la pluie représentative.

Nous en déduisons que, pour l'application de ce genre de modèle conceptuel, la pluie représentative n'est pas forcément la moyenne pondérée, mais une pluie ayant une bonne corrélation avec les débits.

Remarque : Dans la suite du travail, nous utiliserons uniquement la pluie du pluviomètre du barrage (station 2).

V.4.3. Simulation des pluies par les modèles markovien multi-classes

Une fois le modèle pluie-débit paramétré et bien calé, nous avons procédé à la simulation des pluies. Pour cela, nous avons tout d'abord simulé les pluies avec un modèle markovien multi classes, mais sans prendre en considération l'effet des saisons. Ce modèle n'a rien donné, et les scénarii obtenus furent tous rejetés, étant donné que les moyennes ainsi que les écarts types mensuels étaient presque identiques d'un mois à l'autre.

Nous avons ensuite introduit l'effet saisonnier à la simulation des pluies par les chaînes de Markov, en considérant cinq saisons : celles-ci ont été choisies selon les groupements obtenus par l'analyse en composantes principales sur les débits historiques, en sachant qu'il existe une forte corrélation entre les pluies et les débits.

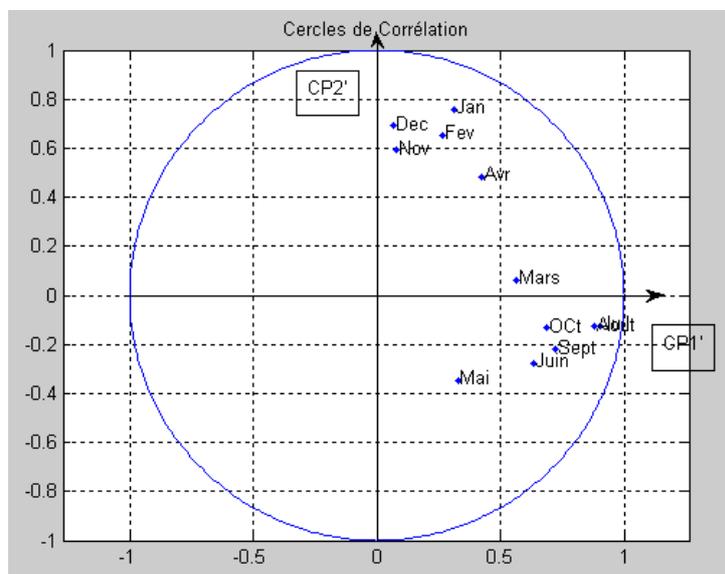


Figure n° V-18: Cercle de corrélation de la CP1' à la CP2' pour les débits mensuels

Les saisons retenues sont :

Saison 1 : Septembre-Octobre.

Saison 2 : Novembre-Décembre-Janvier-Février.

Saison 3 : Mars-Avril.

Saison 4 : Mai-Juin.

Saison 5 : Juillet-Août.

Pour chaque saison, l'échantillon a été découpé en cinq classes dont les limites ont été données aléatoirement de façon à avoir un nombre de valeurs non nul dans chaque classe. Dans le tableau suivant, nous pouvons trouver les limites des classes, en mm, pour chaque saison.

Tableau n° V-7 : Matrice contenant les bornes des classes de chaque saison.

	Saison 1	Saison 2	Saison 3	Saison 4	Saison 5
Classe 1	0--10	0--40	0--40	0--50	0--2
Classe 2	10--30	40--60	40--80	50--80	2--5
Classe 3	30--60	60--100	80--100	80--100	5--8
Classe 4	60--100	100--150	100--130	100--130	8--20
Classe 5	100--185.7	150--332.6	130--392.1	130--175.1	20--44.9

Les matrices de passage pour chaque saison sont représentées dans les tableaux suivants :

Tableau n° V-8 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 1.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.0952	0.0952	0.5238	0.0000	0.2857
C2	0.0870	0.1739	0.3913	0.2609	0.0870
C3	0.1277	0.2128	0.3191	0.2128	0.1277
C4	0.2000	0.2333	0.1333	0.3000	0.1333
C5	0.1333	0.0000	0.3000	0.1667	0.4000

Tableau n° V-9: Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 2.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.0000	0.5385	0.3077	0.0000	0.1538
C2	0.2143	0.3929	0.2143	0.0357	0.1429
C3	0.1818	0.3182	0.3636	0.0909	0.0455
C4	0.5000	0.0000	0.2500	0.0000	0.2500
C5	0.0000	0.5000	0.3750	0.1250	0.0000

Tableau n° V-10 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 3.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.1875	0.5000	0.0625	0.0625	0.1875
C2	0.2414	0.3103	0.2759	0.0345	0.1379
C3	0.3077	0.3846	0.0000	0.1538	0.1538
C4	0.0000	0.8333	0.1667	0.0000	0.0000
C5	0.1818	0.1818	0.2727	0.1818	0.1818

Tableau n° V-11 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 4.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.2174	0.0870	0.4348	0.1739	0.0870
C2	0.3333	0.0000	0.4444	0.1111	0.1111
C3	0.2174	0.1739	0.2609	0.1304	0.2174
C4	0.5455	0.0909	0.1818	0.1818	0.0000
C5	0.5000	0.2500	0.1250	0.1250	0.0000

Tableau n°V-12 : Matrice de passage d'ordre 1 pour la saison 5.

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	0.4211	0.2632	0.1579	0.1053	0.0526
C2	0.2667	0.3333	0.2667	0.0667	0.0667
C3	0.1667	0.1667	0.0556	0.3333	0.2778
C4	0.1667	0.1667	0.4167	0.1667	0.0833
C5	0.3000	0.0000	0.4000	0.1000	0.2000

La simulation a été automatisée grâce à un programme sous Matlab ; ce dernier permet d'obtenir un scénario satisfaisant les 24 critères mentionnés dans le paragraphe V.3.6 à savoir que les moyennes et les écarts types mensuels inter annuels appartiennent respectivement à l'intervalle de confiance des moyennes et des écarts types des valeurs moyennes mensuelles inter annuelles de l'historique.

Parmi les scénarii obtenus, nous avons retenu celui satisfaisant aussi le critère des moyennes et écarts types annuels ; le tableau suivant résume les critères de validation, avec les intervalles de confiance.

Tableau n° V-13 : Critères de validation du scénario obtenu par les chaînes de Markov.

	IC moyennes	Moyenne scénario	IC écarts types	Ecart type scénario
Septembre	[31.5- 53.3]	48.6	[26.5- 41.9]	39.4
Octobre	[48.7-79.1]	50.0	[37.0-58.5]	38.5
Novembre	[76.5-126.9]	106.2	[61.4-97.0]	66.0
Décembre	[93.1-143.2]	105.1	[61.0-96.4]	75.6
Janvier	[100.7-143.2]	121.5	[51.8-81.8]	69.1
Février	[76.2-117.0]	94.3	[49.7-78.6]	57.0
Mars	[70.9-112.8]	89.3	[51.2-80.8]	54.7
Avril	[68.3-107.0]	85.5	[47.2-74.6]	61.0
Mai	[37.8-62.4]	47.4	[30.0-47.4]	43.0
Juin	[12.2-28.2]	22.6	[19.6-31.0]	27.2
Juillet	[3.2-7.8]	6.9	[5.5-8.7]	7.4
Août	[6.7-13.7]	8.8	[8.5-13.5]	10.1
Annuel	[742.6-877.9]	786.1	[164.9-260.6]	196.7

Dans les deux figures suivantes, nous pouvons visualiser les moyennes et écarts types mensuels du scénario simulé, ainsi que l'intervalle de confiance de ces grandeurs.

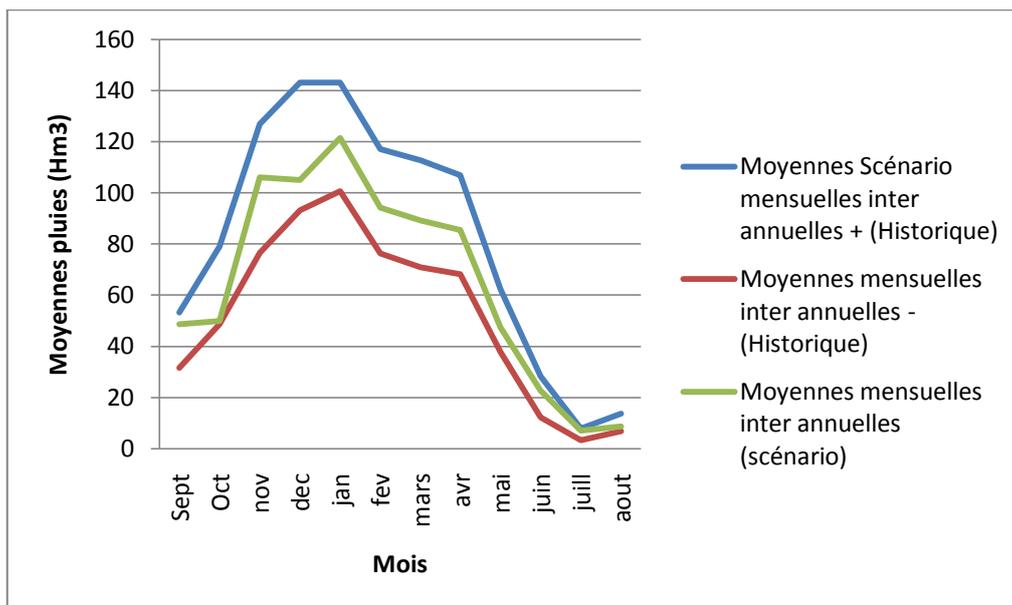


Figure V-19 : Comparaison des moyennes mensuelles interannuelles du scénario simulées.

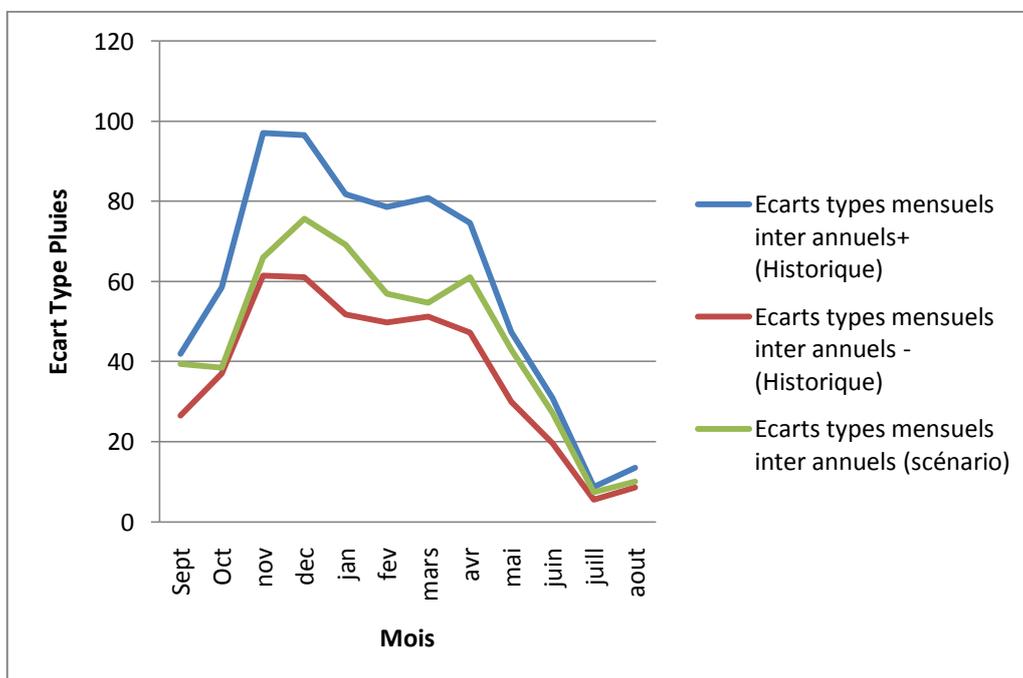


Figure V-20 : Validation des écarts types mensuels interannuels du scénario des pluies simulées.

Le scénario de pluies de 50 années est représenté dans le graphique suivant en bleu et commence à partir de Septembre 2008 ; l'historique quant à lui est représenté en rouge, et s'étale depuis Septembre 1970 jusqu'en Août 2008.

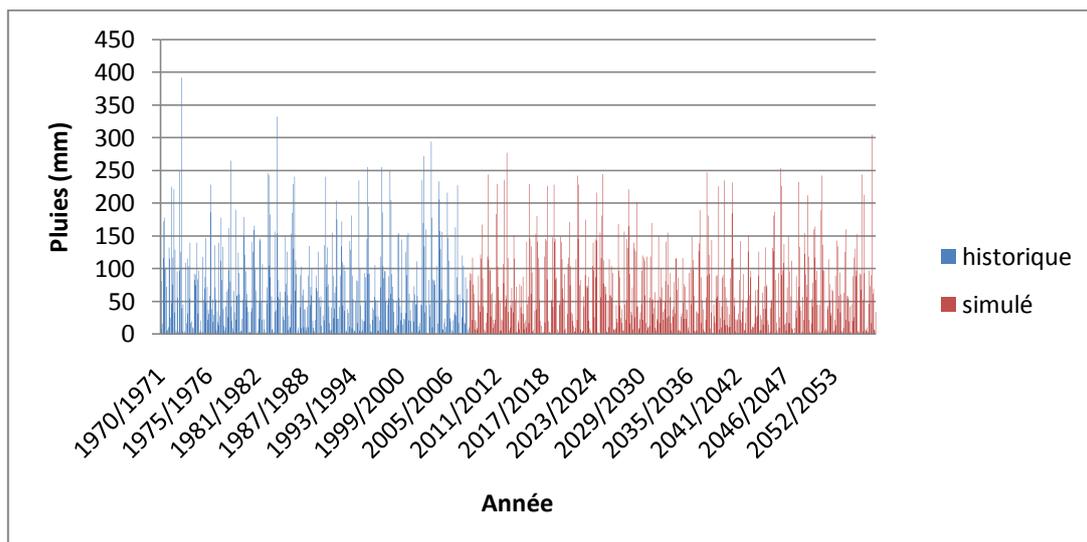


Figure n° V-21 : Représentation dans le temps des pluies historiques et simulées par le modèle markovien multi-classes (pluviomètre barrage).

L'évolution de la pluie simulée en fonction du temps fait ressortir l'inconvénient principal des chaînes de Markov, à savoir le fait que le scénario simulé ne peut jamais contenir des valeurs max supérieures à celles de l'historique ; Ceci est dû au fait que la simulation se fait par le biais de la fonction de répartition.

V.4.4. Simulation des débits par les modèles GR2M

L'introduction des pluies simulées dans le modèle GR2M développé précédemment nous permet d'avoir le scénario des débits simulés représenté dans la figure suivante :

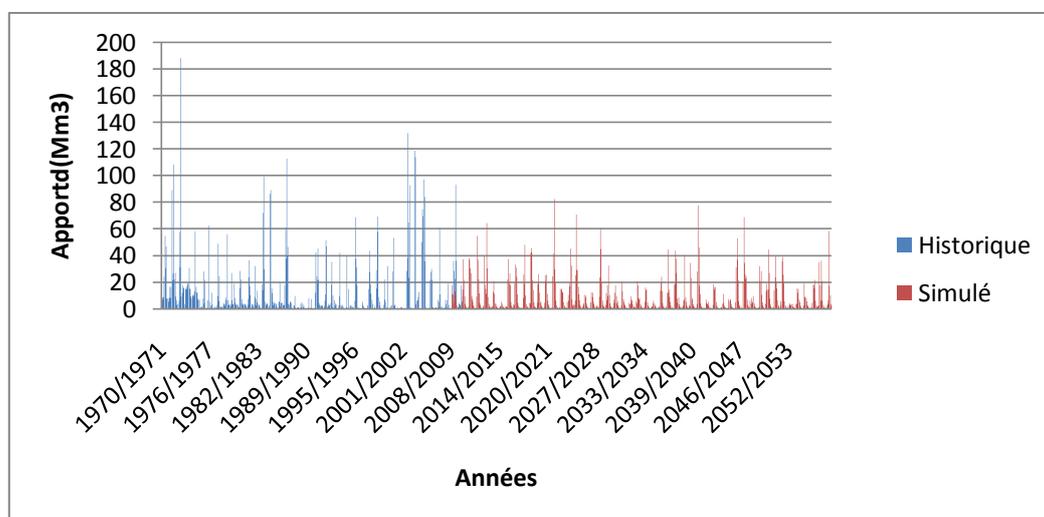


Figure n° V.22 : Représentation dans le temps des débits historiques et simulés par le modèle GR2M.

La série historique commence à partir de Septembre 1970 et se termine en Août 2010 alors que le scénario simulé contient 50 années et commence à partir d’Août 2008. La moyenne des apports moyens annuels simulés sur 50 ans est de 104.1 Mm^3 , tandis que leur moyenne sur la période historique est de 143 Mm^3 .

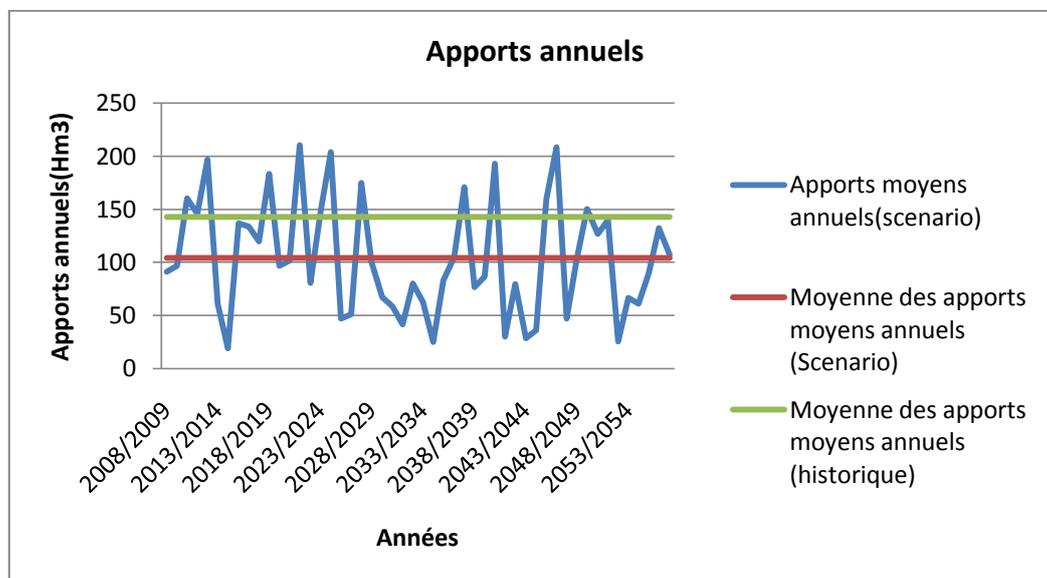


Figure n° V.23 : Représentation des apports moyens annuels du scénario.

Lorsque nous comparons les apports annuels à la moyenne du scénario simulé, nous constatons le même nombre de périodes humides et sèches. En revanche, les périodes sèches contiennent 30 années, contre 20 années seulement pour les périodes humides.

Aussi, nous avons remarqué que la succession des années humides peut aller de 1 à 4 années, alors que les périodes de sécheresse peuvent s’étaler de 1 à 8 années. En outre, nous ne sommes pas parvenus à avoir de probabilités traitant de la succession des périodes sèches et humides en fonction des années que comprend chaque période étant donné que c’est extrêmement aléatoire, ce qui rend la gestion d’autant plus compliquée.

Mieux encore, lorsque nous les comparons à la moyenne des apports annuels historiques, nous obtenons neuf périodes de sécheresse contenant en tout 35 années. Les périodes humides sont au nombre de huit, et ne contiennent que 15 ans.

De plus, le déficit enregistré, par rapport à la moyenne de l’historique est de 2206 hm^3 , contre un surplus de 226 hm^3 et ce durant tout le scénario. Ce scénario a donc été

retenu en tenant compte du nombre élevé d'années sèches qu'il contient et ce afin de confronter notre modèle à un scénario difficile à gérer.

V.5. Gestion future

Le scénario une fois établi, nous sommes passés à la gestion de ce dernier par la méthode des algorithmes génétiques. Comme expliqué dans le chapitre IV, les entrées de l'algorithme génétique sont les apports, les lames d'eau évaporées, que nous avons prises directement de l'historique étant donné que l'évaporation n'a pas un grand impact sur la quantité d'eau dans le barrage, et que c'est une variable cyclique.

Les résultats de la gestion sont satisfaisants ; en effet, malgré la considération de nouvelles valeurs d'apport, nous remarquons que les algorithmes génétiques parviennent à anticiper la défaillance. Ainsi, durant toute la période de gestion future, nous ne sommes pas descendus en dessous du volume mort.

Le graphe ci-dessous représente la variation des taux de satisfactions annuels de la gestion future :

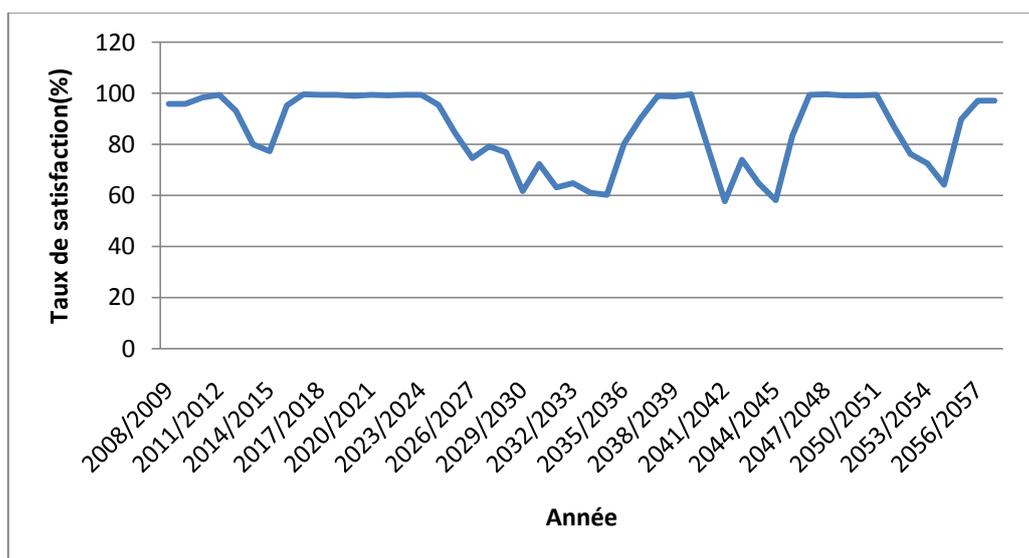


Figure n° V-24 : Taux de satisfaction annuel du scénario simulé pour les trois secteurs confondus

Ainsi, les taux de satisfactions annuels les plus faibles atteignent 60%, ce qui est tout de même très satisfaisant. De plus, le taux de satisfaction global de la gestion future est égal à 85.7%. Concernant les pénalités des dotations annuelles des trois secteurs confondus, elles sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n° V-14 : Pénalités des dotations annuelles des trois secteurs confondus pour le scénario futur.

Pénalités des lâchers Totaux			scénario
Bonne	P1	>82	0.6
Moyenne	P2	[57 82]	0.4
Faible	P3	< 57	0

Nous remarquons que 60% des dotations mensuelles totales sont bonnes, alors que seulement 40% sont moyennes. Il n'y a donc aucune dotation annuelle considérée comme étant faible, ce qui est en soit un excellent résultat.

Comme pour la gestion historique effectuée par les algorithmes génétiques, les dotations de chaque secteur sont allouées avec les mêmes priorités, à savoir : prendre les dotations mensuelles totales et les allouer aux trois secteurs, en donnant la priorité à l'AEP, ensuite l'AEI, puis l'irrigation.

Le tableau suivant représente les pénalités des dotations annuelles pour chaque secteur.

Tableau n° V-15 : Pénalités des dotations annuelles de chaque secteur pour le scénario futur.

Bonne	P11	>32	0.76
Moyenne	P12	[24 32]	0.22
Faible	P13	[0 24]	0.02
Bonne	P21	>10	0.56
Moyenne	P22	[8 10]	0.18
Faible	P23	<8	0.26
Bonne	P31	>40	0.58
Moyenne	P32	[25 40]	0.4
Faible	P33	<25	0.02

Nous remarquons que pour les trois secteurs, le plus grand pourcentage des dotations est situé dans l'intervalle des bonnes satisfactions, avec 76% pour l'AEP, on voit bien la priorité qui a été donnée à ce secteur. En revanche, on remarque que les probabilités d'avoir de bonnes satisfactions pour les secteurs de l'industrie et de l'irrigation sont à peu près égaux et sont de 56% et 58% respectivement.

Pour ce qui est des faibles satisfactions, elles ne contiennent que très peu de valeurs que ce soit pour l'AEP, ou pour l'irrigation, avec seulement 2% des valeurs. L'AEI quant à elle enregistre 26% de ses dotations dans la tranche des faibles satisfactions : ceci prouve que, le dispatching ou l'allocation manuelle ne donne pas toujours de très bons résultats, même si, de manière générale, ils sont satisfaisants.

Les résultats sont ainsi très intéressants, et satisfaisants. Néanmoins, malgré les bonnes performances de la méthode utilisée pour la détermination manuelle des allocations des trois secteurs, le calcul reste laborieux, d'où l'idée de l'automatiser et de l'améliorer en utilisant les réseaux de neurones.

V.6. Amélioration du modèle par les réseaux de neurones

V.6.1. Généralités sur les réseaux de neurones

Le développement des connaissances de la structure interne du cerveau, et la compréhension d'une partie de son fonctionnement a contribué de façon remarquable à l'émergence des réseaux de neurones artificiels.

V.6.1.1. Le neurone biologique

Le neurone est l'unité fonctionnelle de base du système nerveux, et peut présenter certaines différences fonctionnelles selon les espèces. Du point de vue anatomique, le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former les dendrites. C'est par les dendrites que les informations sont acheminées de l'extérieur vers le soma, qui représente le corps du neurone (Figure V-24).

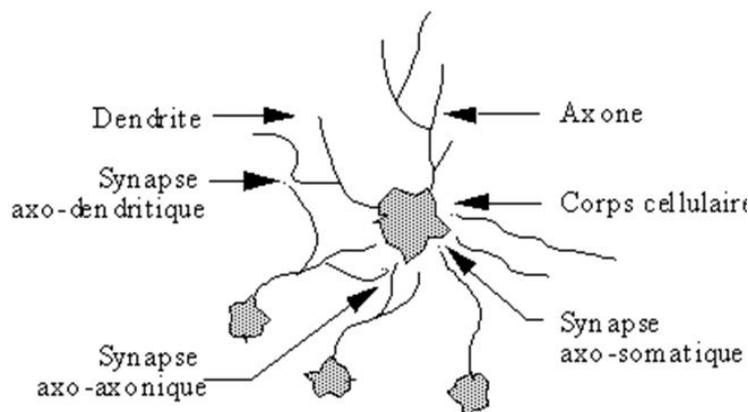


Figure n° V-25 : Schéma simplifié du neurone.

Chaque neurone est une unité autonome au sein du cerveau. Le neurone reçoit en continu des entrées (informations). La réponse, unique, à ces signaux est envoyée au travers de l'axone. L'information réside, principalement dans l'architecture des connexions, et dans la force de ces connexions (Touzet, 1992)

V.6.1.2. Le neurone formel (artificiel)

Développé par Mc Culloch et Pitts (1943), le neurone formel est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Chaque neurone artificiel reçoit un nombre variable d'entrées en provenance du neurone amont. A chacune de ces entrées est associé un poids (w) représentatif de la force de la connexion.

Un neurone est donc une fonction algébrique, non-linéaire paramétrée, à valeurs bornées (Dreyfus et al., 2004). Les variables sur lesquelles opèrent les réseaux sont habituellement désignées sous le terme du neurone, et la valeur de la fonction sous celui de sortie. Un poids d'un neurone artificiel représente donc l'efficacité d'une connexion synaptique. Un poids négatif vient inhiber une entrée, alors qu'un poids positif vient l'accentuer (Benkaci, 2006).

V.6.2 Elaboration du modèle des réseaux de neurones

Afin d'obtenir les allocations optimales des différents secteurs en considérant les données de la consommation totale obtenue par les algorithmes génétiques, nous avons utilisé un programme sous Matlab, et l'avons inséré dans celui des algorithmes génétiques.

Les paramètres du modèle seront obtenus par l'introduction des données obtenues par la gestion passée (sur 40 ans) par les AG. Ainsi, en exécutant le programme des AG, nous aurons en plus des dotations totales pour la période de gestion, les allocations pour les trois secteurs, les caractéristiques du modèle utilisé sont les suivantes :

- ✓ Une couche d'entrée, pourvue d'un neurone : ce sont les consommations totales issues des algorithmes génétiques appliqués sur l'historique (C.tot) ;
- ✓ Une couche cachée, comprenant 13 neurones ;
- ✓ Une couche de sortie, contenant en tout 3 neurones :
 - 1^{er} neurone : représentant les allocations de l'AEP ;
 - 2^{ième} neurone : représentant les allocations de l'irrigation ;

3^{ième} neurone : représentant les allocations de l'AEI ;

- ✓ La fonction de transfert des neurones de la couche cachée est une fonction Sigmoidale.
- ✓ L'apprentissage se fait sur 60% des données, le calage sur 20%, et le test sur 20%.

Remarque : La période de test est utilisée afin d'éviter le sur-apprentissage des neurones.

L'exécution du programme nous a donné les paramètres suivants :

Tableau n° V-16 : Poids de la couche d'entrée vers la couche cachée.

$W_{1,1}$	$W_{2,1}$	$W_{3,1}$	$W_{4,1}$	$W_{5,1}$	$W_{6,1}$	$W_{7,1}$	$W_{8,1}$	$W_{9,1}$	$W_{10,1}$	$W_{11,1}$	$W_{12,1}$	$W_{13,1}$
-18.75	-17.04	18.05	18.00	-18.75	-17.65	19.11	18.38	-15.55	27.85	16.12	21.86	4.30

Tableau n° V-17 : Biais de la couche cachée.

B_1^1	B_2^1	B_3^1	B_4^1	B_5^1	B_6^1	B_7^1	B_8^1	B_9^1	B_{10}^1	B_{11}^1	B_{12}^1	B_{13}^1
46.83	41.37	-34.93	-28.86	22.18	15.60	-10.75	-3.78	-3.25	15.50	10.29	15.79	4.97

Tableau n° V-18 : Poids de la couche cachée vers la couche de sortie.

	$W_{1,j}$	$W_{2,j}$	$W_{3,j}$	$W_{4,j}$	$W_{5,j}$	$W_{6,j}$	$W_{7,j}$	$W_{8,j}$	$W_{9,j}$	$W_{10,j}$	$W_{11,j}$	$W_{12,j}$	$W_{13,j}$
<i>Neurone(1)</i>	-0.69	0.67	0.10	-0.03	-0.09	0.09	0.00	0.01	0.15	1.30	-3.77	1.99	6.92
<i>Neurone(2)</i>	0.10	-0.44	0.18	0.77	-0.32	-0.35	0.37	0.38	-0.47	0.07	0.44	-0.24	0.06
<i>Neurone(3)</i>	0.00	0.00	-0.01	0.01	-0.03	0.04	0.01	-0.02	-0.05	2.25	-6.30	5.20	2.88

Tableau n° V-19 : Biais de la couche de sortie.

B_1^2	B_2^2	B_3^2
-6.0513	0.6353	-3.5493

Lorsque l'allocation totale est X, et afin d'obtenir les allocations Y1, Y2, et Y3 pour les secteurs de l'AEP, l'irrigation, et l'AEI respectivement, le modèle passe par les calculs suivants :

1. Normalisation de la consommation totale :

$$X_N = \frac{X - MoyCtot}{stdCtot}$$

Où : X_n : valeur normalisée de la consommation totale

$MoyCtot$: Moyenne des consommations totales données par l'Algorithme génétique pour la gestion passée.

$stdCtot$: Ecart type des consommations totales données par l'Algorithme génétique pour la gestion passée.

2. Calcul des sommes pondérées :

$$S_i = W_{i1} + B_i^1 \quad \text{pour } i=1 \text{ à } 13$$

Où :

W_{i1} : Poids de la couche d'entrée vers la couche cachée.

B_i^1 : Biais des neurones de la couche d'entrée.

3. Calcul des sorties de chaque neurone de la couche cachée par la fonction Sigmoid.

$$Sig_i = \frac{1}{1 + e^{-s_i}}$$

4. Calcul des dotations pour chaque secteur

Tableau n° V-20 : Calcul des valeurs des neurones de sorties.

Secteur	Equation de calcul
AEP	$Y1 = \sum_{i=1}^{13} (W_{i,1} \times Sig_i) + B_1^2$
Irrigation	$Y2 = \sum_{i=1}^{13} (W_{i,2} \times Sig_i) + B_2^2$
AEI	$Y3 = \sum_{i=1}^{13} (W_{i,2} \times Sig_i) + B_3^2$

V.6.3 Résultats du modèle des réseaux de neurones

Les résultats sont très concluants ; en effet, les valeurs des coefficients de détermination pour les périodes de calage et de validation de chaque secteur sont très élevées. Ils sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau n° V-21 : Coefficients de détermination pour les trois secteurs en période de calage et de validation issues du modèle des réseaux de neurones.

		Secteurs		
		AEP	Irrigation	AEI
R²	Calage	0.969	0.999	0.921
	Validation	0.894	0.996	0.864

Les figures ci dessous représentent les corrélations entre allocations simulées et calculées par les réseaux de neurones pour chaque secteur, et ce, pour les périodes d'apprentissage et de validation du modèle.

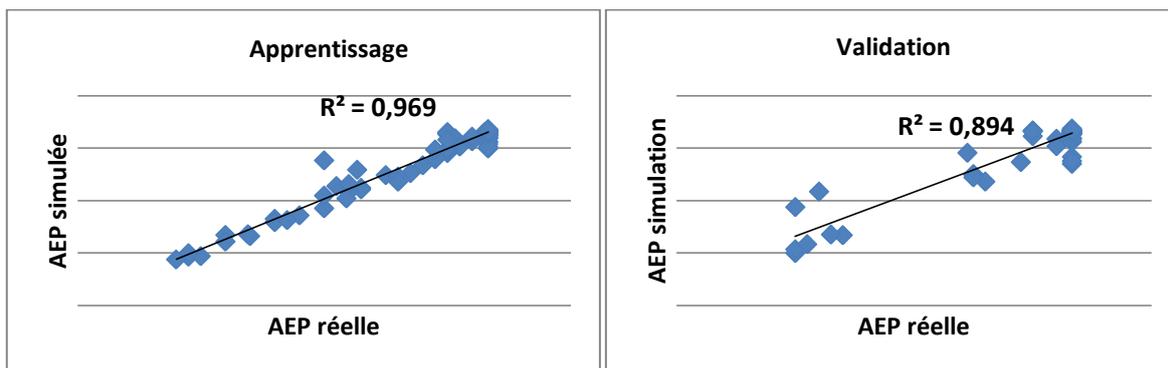


Figure n° V-26 : Corrélation entre dotations manuelles pour l'AEP, et dotations simulées par les Réseaux de Neurones

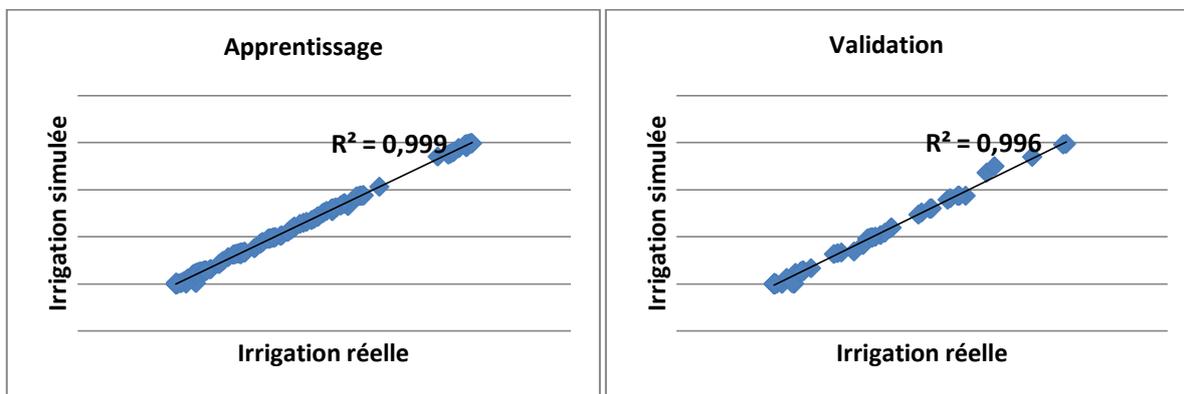


Figure n° V-27 : Corrélation entre dotations manuelles pour l'Irrigation, et dotations simulées par les Réseaux de neurones

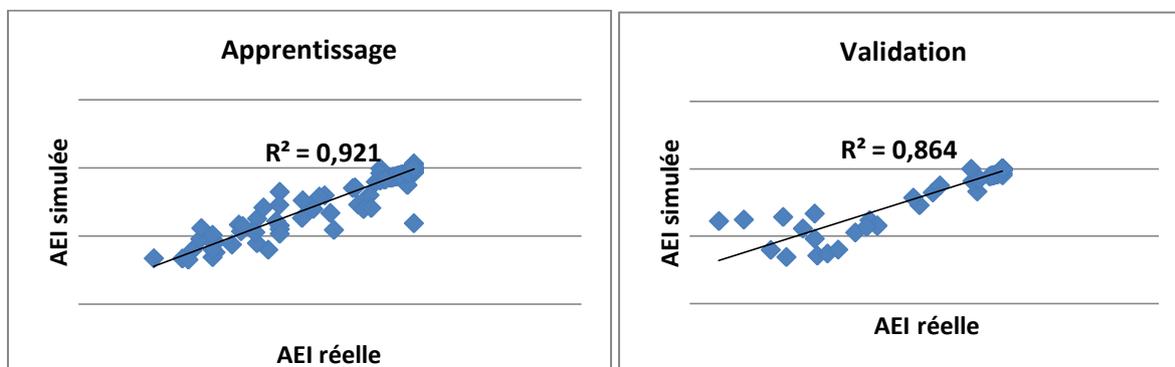


Figure n° V-28 : Corrélation entre dotations manuelles pour l'AEI, et dotations simulées par les Réseaux de Neurones

Le tableau suivant représente les pénalités des allocations annuelles des différents secteurs pour les deux gestions : Manuelle et par RN.

Tableau n° V-22: Comparaison des pénalités annuelles des trois secteurs pour les gestions manuelles et par Réseaux de Neurones.

			Manuelle	RN
Bonne	P11	>32	0.76	0.82
Moyenne	P12	[24,32]	0.22	0.18
Faible	P13	[0,24]	0.02	0
bonne	P21	>10	0.56	0.64
Moyenne	P22	[8,10]	0.18	0.36
Faible	P23	<8	0.26	0
Bonne	P31	>40	0.58	0.54
Moyenne	P32	[25,40]	0.4	0.36
Faible	P33	<25	0.02	0.1

En comparant les résultats des deux méthodes en termes de pénalités, nous remarquons que les probabilités d'avoir de bonnes satisfactions sont passées de 76% en gestion manuelle à 82% en gestion par RN. Il en est de même pour le secteur de l'industrie, qui a vu une augmentation de 8% des bonnes satisfactions.

Les probabilités d'avoir des satisfactions moyennes pour l'AEP ont de ce fait diminué, et aucune faible satisfaction n'a été enregistrée. En revanche, pour l'AEI, on note une augmentation des probabilités d'avoir une satisfaction moyenne, mais ceci est positif étant donné qu'il n'y a pas non plus de faibles taux de satisfactions.

Concernant l'irrigation, nous remarquons le contraire : les probabilités ont diminué de 4% pour les fortes satisfactions, de 0.04% pour les moyennes, et les faibles ont augmenté de 0.08%/. Ceci est tout à fait logique étant donné que, grâce aux réseaux de neurones, on parvient à avoir la priorité pour l'AEP, ensuite l'AEI, et enfin l'irrigation. Les dotations pour l'AEP et l'AEI ont augmenté au détriment de celle de l'irrigation, ce qui rend nos résultats très concluant.

Les résultats du calcul de pénalités sont représentés dans le tableau suivant : Lorsque nous traçons les courbes des allocations pour chaque secteur, et pour chaque méthode, nous remarquons que la tendance des allocations par la méthode des réseaux de neurones suit très

bien celle de l'allocation manuelle. En outre, nous avons la confirmation que les réseaux de neurones augmentent les allocations pour l'AEP, et l'AEI, et diminuent un peu de l'irrigation.

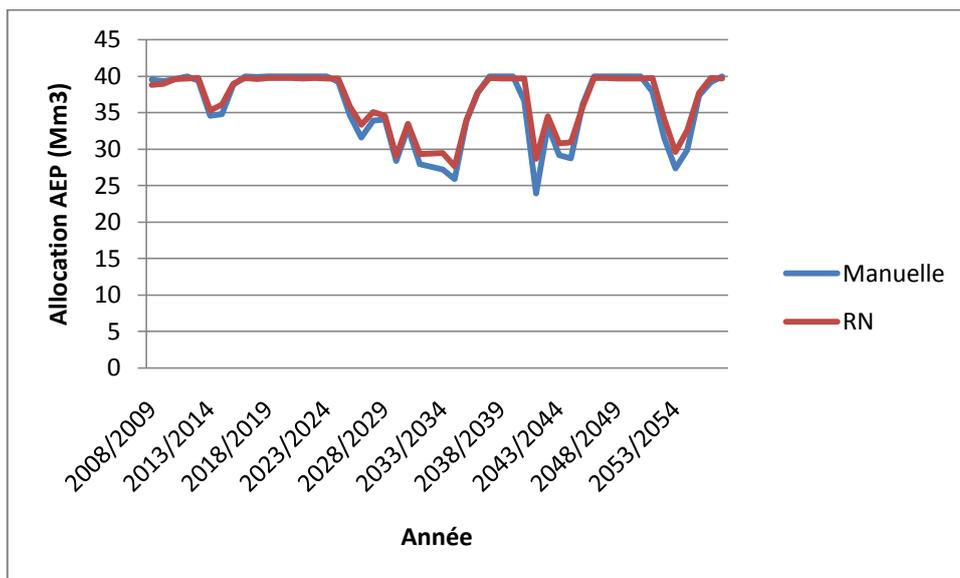


Figure n° V-29 : Comparaison des allocations de l'AEP par les modèles de gestion manuelle et par les réseaux de neurones.

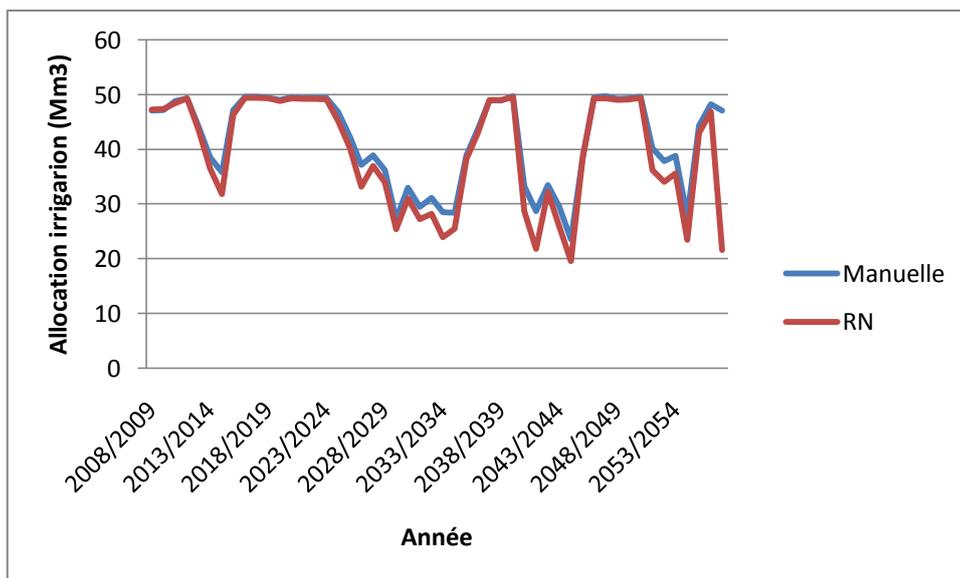


Figure n° V-30 : Comparaison des allocations de l'Irrigation par les modèles de gestion manuelle et par les réseaux de neurones.

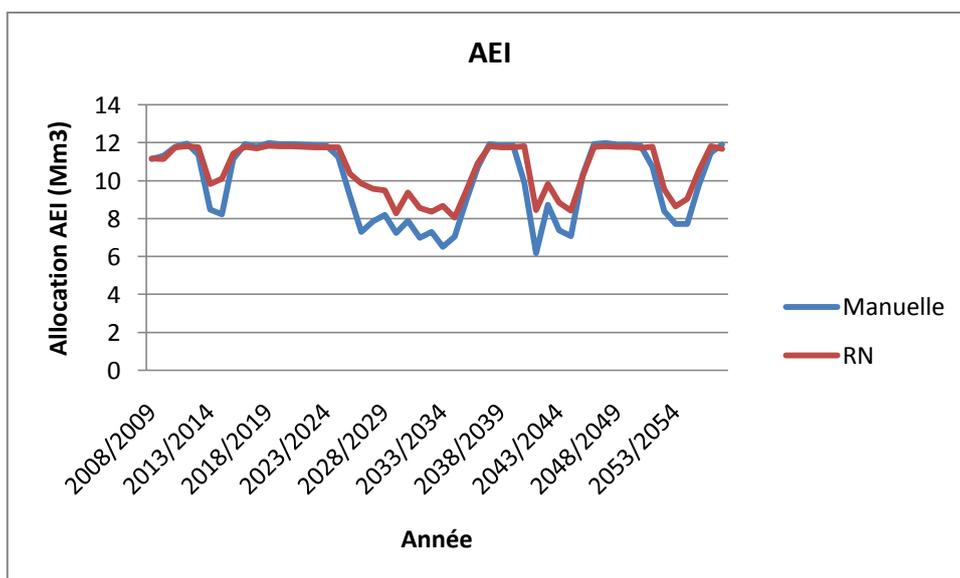


Figure n° V-31 : Comparaison des allocations de l’AEI par les modèles de gestion manuelle et par les Réseaux de neurones.

Pour confirmer que la méthode des réseaux de neurones a bel et bien tenu compte des priorités pour l’attribution des dotations de chaque secteur, nous avons analysé les taux de satisfaction annuels obtenus par les deux méthodes ; ces derniers sont représentés dans les graphes suivants :

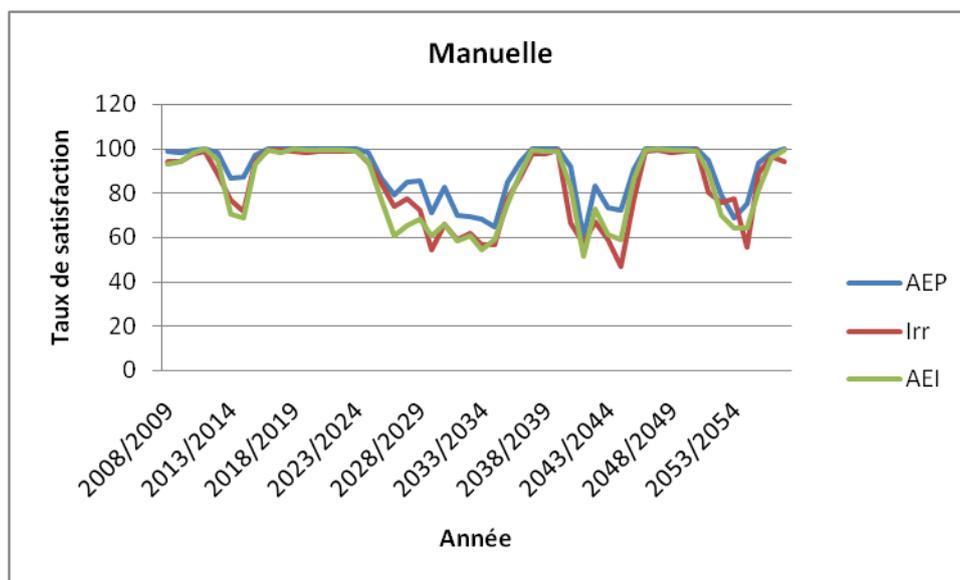


Figure n° V-32 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de gestion manuelle.

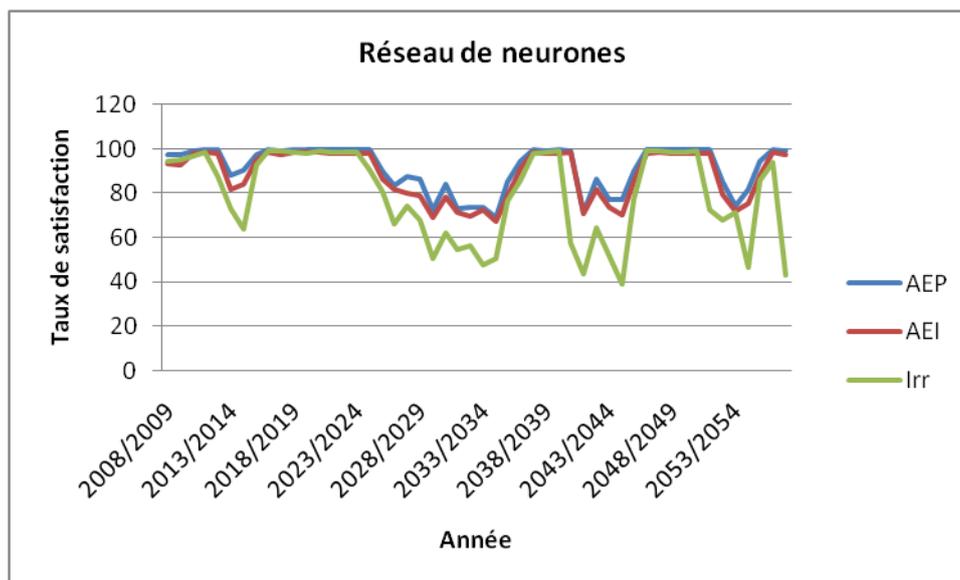


Figure n° V-33 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de gestion par les Réseaux de Neurones.

En comparant les figures V-28 et V-29, nous remarquons que, pour les deux méthodes, le critère de priorité est généralement respecté. Néanmoins, une nette amélioration est observée pour la gestion par les Réseaux de Neurones. En effet, sur toute la période considérée, la seconde méthode a toujours respecté les priorités sauf les deux premières années.

La seconde gestion enregistre toutefois des fluctuations entre les priorités données à l'AEI et à l'irrigation. La priorité a quand même été donnée, en premier à l'AEP. Les moyennes des taux de satisfactions des trois secteurs viennent confirmer ces résultats ; elles sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n° V-23 : Moyennes des taux de satisfactions annuels des trois secteurs pour les gestions manuelles et par RN.

	AEP	Irrigation	AEI
Manuelle	89.61	83.21	83.26
RN	91.33	79.09	88.48

Nous remarquons que pour les deux méthodes, l'AEP a le plus grand taux de satisfaction. Mais alors que la méthode manuelle attribue le même taux de satisfaction moyen pour l'AEI et l'irrigation, la méthode des réseaux de neurones donne un meilleur taux de

satisfaction pour l'AEI (83%) ; L'irrigation quant à elle passe au troisième plan avec seulement 79% du taux de satisfaction. Ce qui correspond exactement aux résultats désirés.

V.7. Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous avons noté que la simulation des apports n'était pas toujours évidente du fait de la complexité de leur génération ; aussi, le modèle pluie-débit est un excellent moyen de contourner ce problème. Toutefois, la difficulté de ce modèle réside dans le choix d'une pluie représentative.

En outre, la simulation des pluies par les chaînes de Markov multi-classes donne de bons résultats à condition d'introduire l'effet saisonnier dans la modélisation. Mais il reste tout de même le problème des valeurs extrêmes qui ne peuvent pas être générées, ce qui diminue de la pertinence des scénarii obtenus.

Nous avons confirmé, aussi, que les algorithmes génétiques sont un excellent moyen d'optimisation de la gestion. En effet, malgré le choix d'un nouveau scénario d'apport défavorable, l'algorithme a réussi à prévenir les défaillances, et à les éviter tout en gardant un taux de satisfaction annuel relativement bon pour les années d'extrêmes sécheresse, et élevé pour les années humides. Les années sèches connaissent de légères diminutions de leur taux de satisfaction afin de minimiser l'impact de la sécheresse une fois survenue.

Le couplage des AG avec les réseaux de neurones est tout à fait concluant, et les résultats s'en trouvent améliorés. Ainsi, la gestion manuelle n'est pas toujours à conseiller, même si celle-ci est rationnelle et guidée par la réflexion humaine.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Lorsque nous avons entamé ce travail, l'objectif principal était de dégager une méthodologie susceptible d'apporter une contribution au problème de la gestion de la ressource en eau, et ce par l'élaboration d'un modèle d'optimisation de la gestion d'un barrage réservoir à buts multiples.

Ce modèle, constituant un outil d'aide à la décision contribuera à court, moyen et long terme à la satisfaction des besoins en eau de la population, de l'industrie, et de l'agriculture de la région d'Annaba à partir du barrage de la Cheffia, qui a été pris comme exemple d'application.

Ce barrage régularisant une quantité de 104 Mm^3 d'eau par an pour les trois secteurs n'arrive pas à satisfaire la demande et ce malgré les apports annuels moyens de 140 Mm^3 qu'il reçoit.

Ceci est dû à la grande variation des apports d'une année à l'autre et constitue un défi pour le gestionnaire et est en soi un excellent terrain pour la recherche.

Le modèle utilisé pour l'optimisation de la gestion est basé sur les algorithmes génétiques ; Ce dernier permet l'obtention des allocations mensuelles des trois secteurs confondus.

Pour obtenir les allocations mensuelles de chaque secteur, le modèle a été couplé au deuxième modèle élaboré basé sur les réseaux de neurones.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants mais dépendent essentiellement de la simulation des apports ; cette dernière a été élaborée à partir des chaînes de Markov.

La série synthétique des apports a été intégrée dans le modèle d'optimisation.

L'analyse des résultats obtenus à partir du modèle de gestion montre que la satisfaction des besoins en eau à long terme est relativement possible à condition d'accepter une certaine diminution du taux de satisfaction lors des années d'extrême sécheresse.

Enfin, on peut dire que la méthodologie adoptée est d'une grande importance car elle permet d'avoir un outil d'aide à la décision applicable à n'importe quel autre barrage compte tenu, bien entendu, de ses caractéristiques propres.

Recommandations :

Pour la suite de ce travail, nous recommandons les tâches suivantes :

- ✓ Connaitre les dotations exactes des trois secteurs, en mensuels.
- ✓ Ajouter des pénalités au modèle par AG sur la vidange et le déversement.
- ✓ Appliquer les algorithmes génétiques en mode multi-objectifs.
- ✓ Utiliser un modèle de prévision des apports.
- ✓ Passer en gestion journalière.
- ✓ Utiliser d'autres modèles d'optimisation tels que : les essais particuliers, les colonies de fourmis, le recuit simulé, le data mining, les réseaux de neurones et la neurofloue.
- ✓ Faire un comparatif entre plusieurs modèles afin d'en désigner le plus approprié.
- ✓ Utiliser les indices de fiabilité pour la validation de l'optimisation de la gestion.
- ✓ Introduire de nouvelles fonctions objectifs telles que la minimisation du coût.
- ✓ Pour le barrage, nous recommandons la constriction d'un autre ouvrage en aval, en raison des fortes quantités d'eau évacuées dans la nature lors des périodes humides.

BIBLIOGRAPHIE

Abdou.H.M., (1996). Exploitation d'un réservoir à buts multiples en période de pénurie, Ph.D. Université de Montréal. Ecole polytechnique de Montréal.

Ben sassi, S. Vers une optimisation de la gestion intégrée en temps réel des ressources hydriques, LAREQUAD (laboratoire de recherche en économie quantitative de développement)-Tunis, Tunisie-

Benkaci, A., (2006), « Thèse de doctorat : Modélisation pluie-Débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes Neuro-Flous (Application aux bassins algériens) »

Bermad, A. (1990) « Thèse de magister : Elaboration d'un modèle de gestion d'un barrage réservoir : application au barrage de la Chaffia (Annaba) ».

Bermad, A. (2004) « Thèse de doctorat : Elaboration d'une méthodologie de simulation et de prévision des variables climatologiques aléatoires et cycliques par l'analyse en composantes principales ».

Bouroche, J-M., Saporta, G. (1980). *L'analyse des données*. Presse universitaire de France. Paris.

Bouziane. A., (1989). Contribution à la modélisation stochastique de débits mensuels et à la recherche de la meilleure règle de gestion d'un réservoir, Université catholique de Louvain.

Colette, Y., Siarry, P., (2002). *Optimisation multiobjectif*. Paris. EYROLLES

Dréo J.,Pétrowsky A., Taillard E. (2003) *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Paris, EYROLLES

Durand, N., Gotteland, J-B., *Algorithme génétiques appliqués au trafic aérien*, in Métaheuristique pour l'optimisation difficile Paris, Eyrolles, p267-294.

Fang, Z. X., Voron, B. et Bocquhjlou, C., (1990) *Programmation dynamique: application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation*, Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques, 34,4, 8

Gharsallah, O., Nouiri, I., Lamaddalena, M., and Lebdi, F., use of the genetic algorithm for the optimal operation of multi-reservoirs demand irrigation system.

Giard, V., (1993). *Statistiques appliquées à la gestion*. Paris, ECONOMICA.

Janaud, S., (2005), « Master of Science : La gestion de l'eau dans les puits collectifs du Bajio de guanajuato : analyse et proposition à l'aide d'un modèle de programmation mathématique »

Jordan, F., (2007), « Thèse de doctorat N°37101 : Modèle de prévision et de gestion des crues optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue »

Krimil, F., (2009), « Mémoire de fin d'études : Essai de modélisation de la gestion du barrage de Foug el Gherza (Biskra) »

Lebdi, F., Slimani, M., et Parent, E., *Stratégie empirique d'un système de ressources en eau : l'exemple d'un périmètre irrigué en zone semi-aride* in *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 10, n° 1, 1997, p. 121-134.

Mathlouthi, M. et Lebdi, F. (2009), *Emploi de la série chronologique des événements secs générés dans l'optimisation de la gestion des barrages*, *Hydrological Sciences Journal*, 54: 5, 841- 851

Mathlouthi, M., et Lebdi, F. (2008), *Evaluation de la fiabilité de gestion d'un barrage réservoir pour des événements secs*, *Hydrological Sciences Journal*, 53: 6, 1194 — 1207

Moulin, L., (2003), « DEA : Prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global »

Pabiot, F. (1999), « Mémoire de fin d'études : Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride »

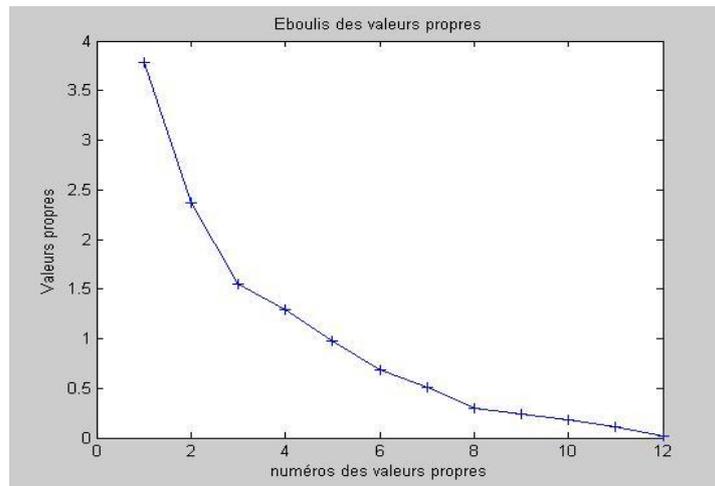
Parent, E. (1991), « Thèse de doctorat : Elaboration des consignes de gestion des barrages réservoirs ».

Taslina, A., et Slobodan Simonovis P., (2004), *Modelling uncertainties in short-term reservoir operation using fuzzy sets and a genetic algorithm*, *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, 49(6) December 2004

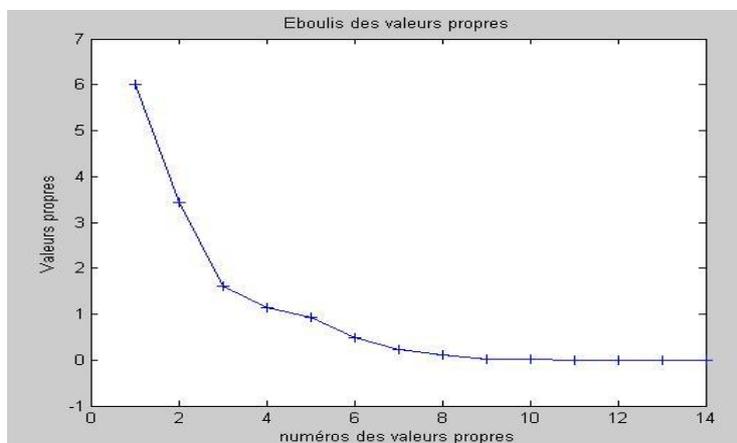
Annexe I : Analyse en composantes Principales

Annexe I-1 : Eboulis des valeurs propres.

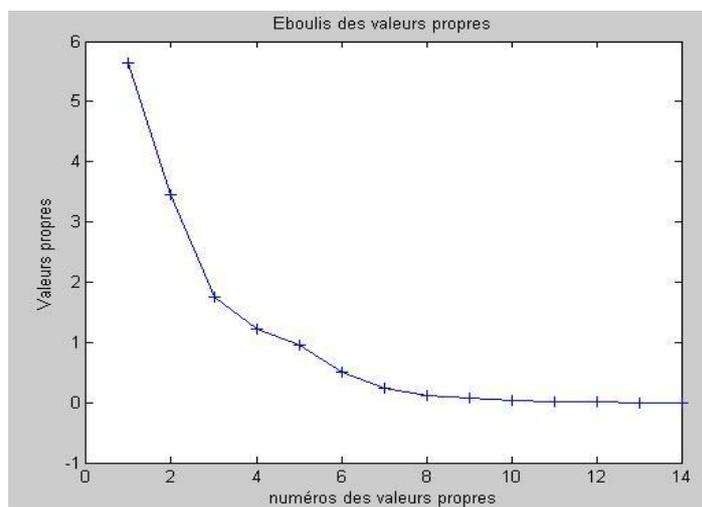
Annexe I-1-1 : Débits mensuels..



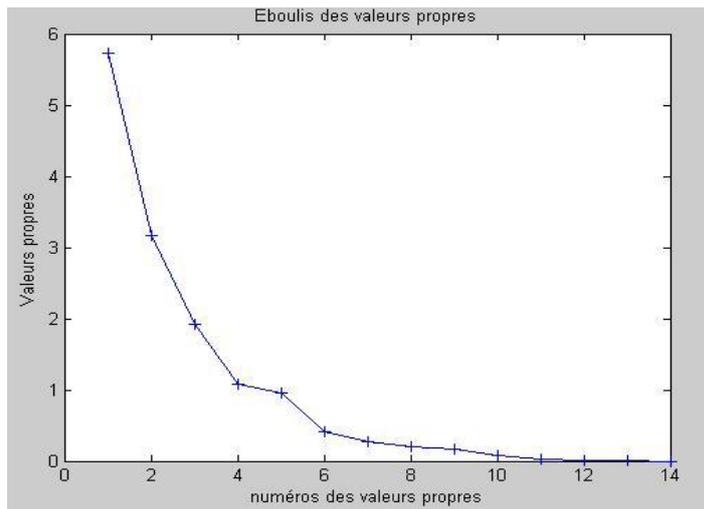
Annexe I-1-2 : Gestion réelle.



Annexe I-1-3 : Gestion manuelle.

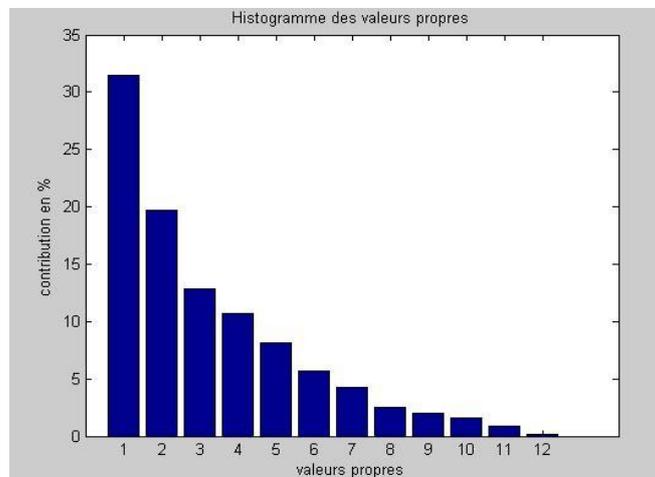


Annexe I-1-4 : Gestion par AG.

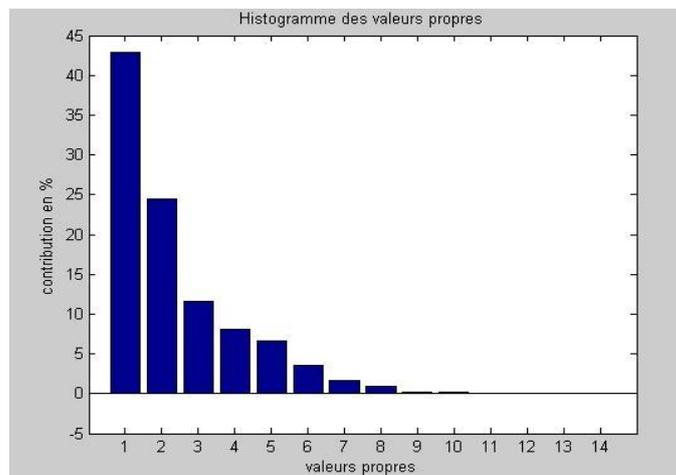


Annexe I-2 : Histogramme des valeurs propres.

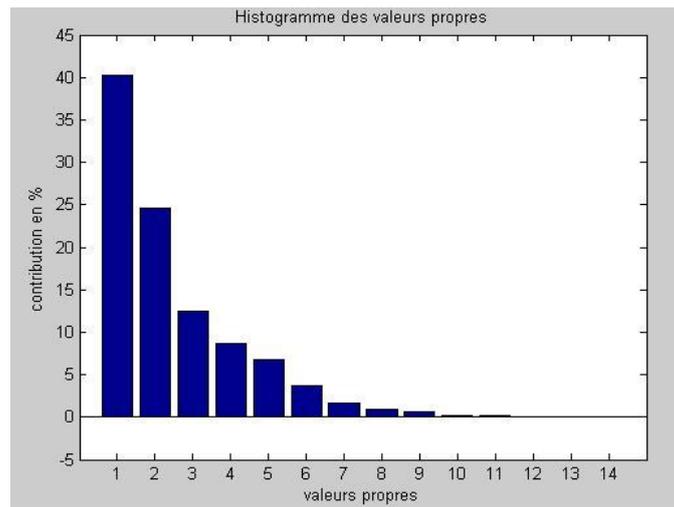
Annexe I-2-1 : Débits mensuels.



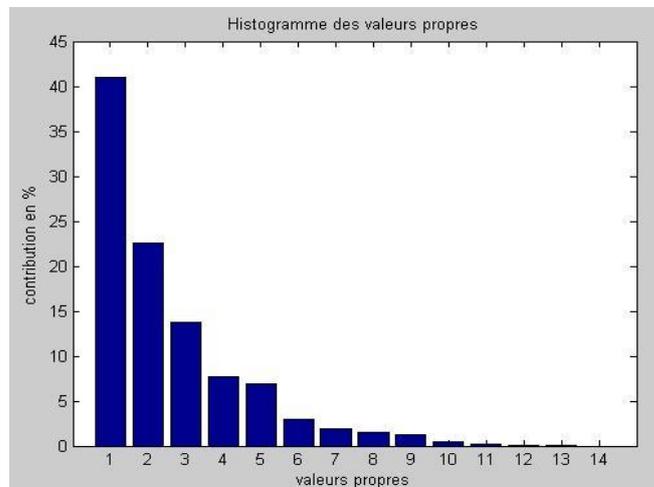
Annexe I-2-2 : Gestion réelle.



Annexe I-2-3 : Gestion rationnelle.

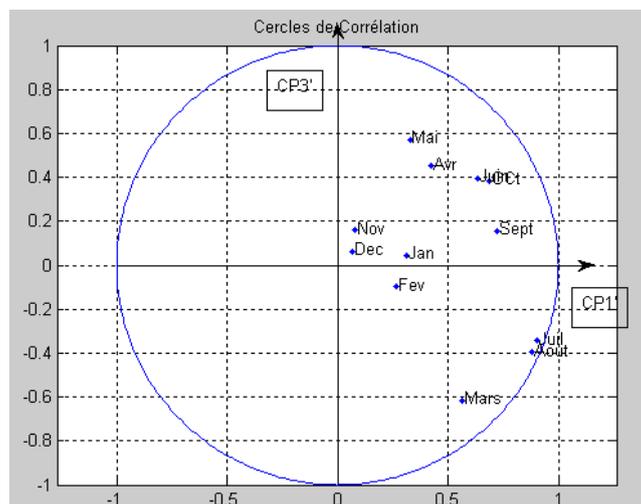


Annexe I-2-4 : Gestion par AG.

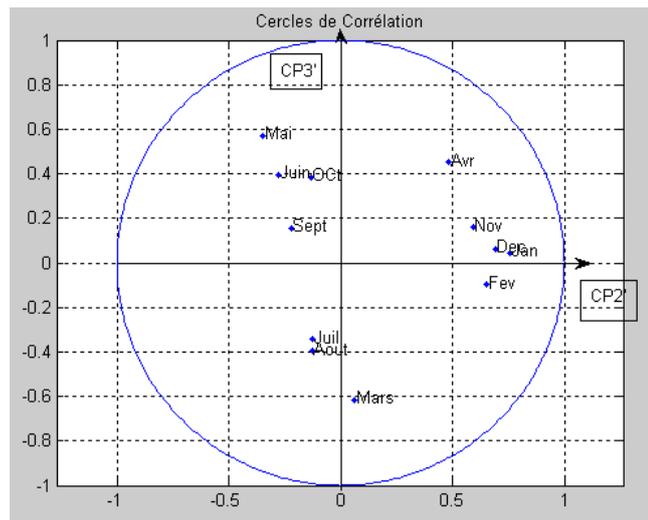


Annexe I-3 : Cercles de corrélation

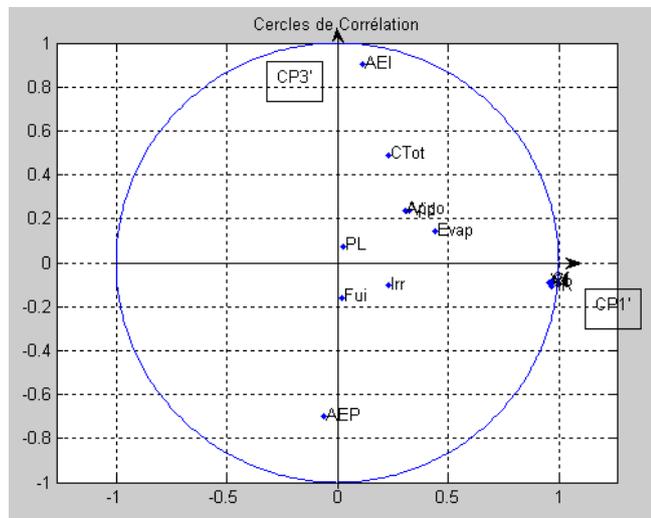
Annexe I-3-1 : Cercle de corrélation des CP1' et CP3' : débits mensuels



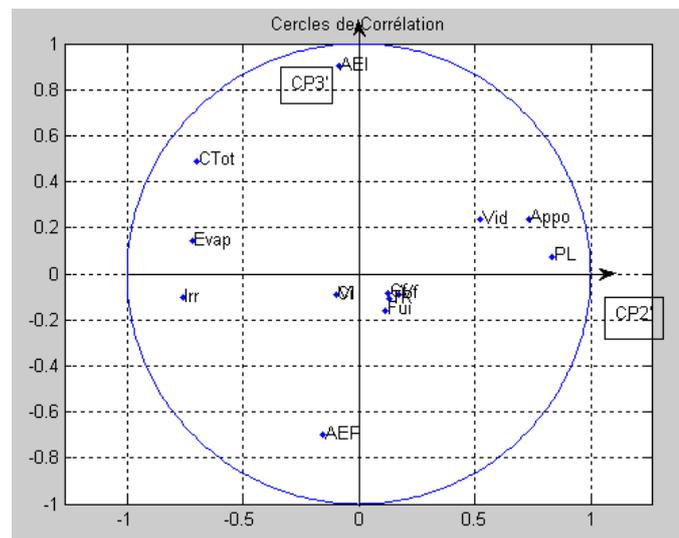
Annexe I-3-2 : Cercle de corrélation des CP2' et CP3' : débits mensuels



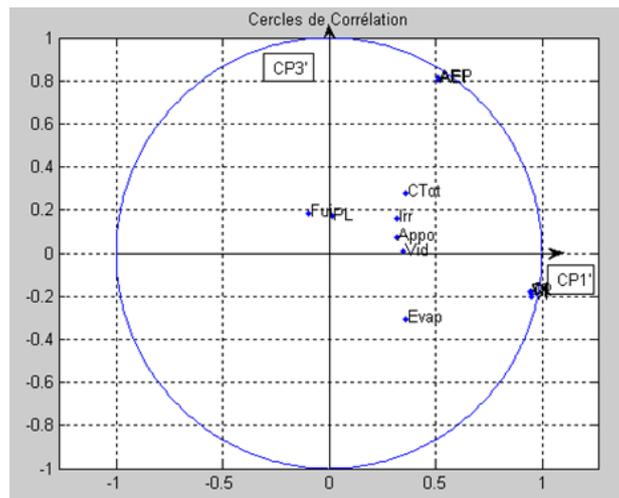
Annexe I-3-3 : Cercle de corrélation des CP1' et CP3' : gestion réelle



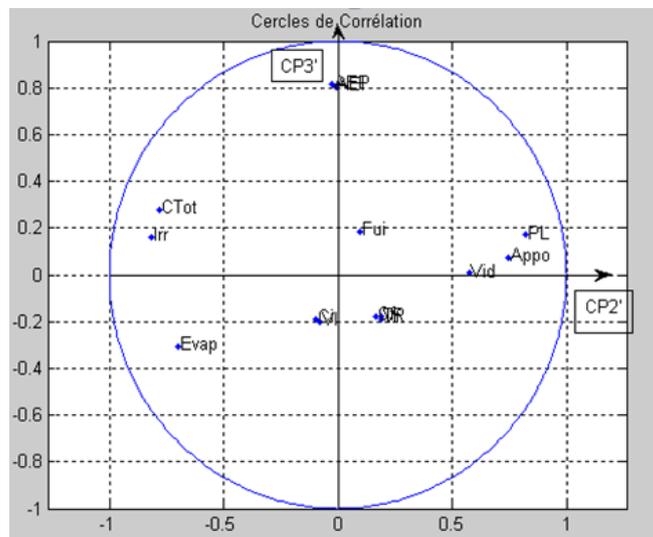
Annexe I-3-4 : Cercle de corrélation des CP2' et CP3' : gestion réelle



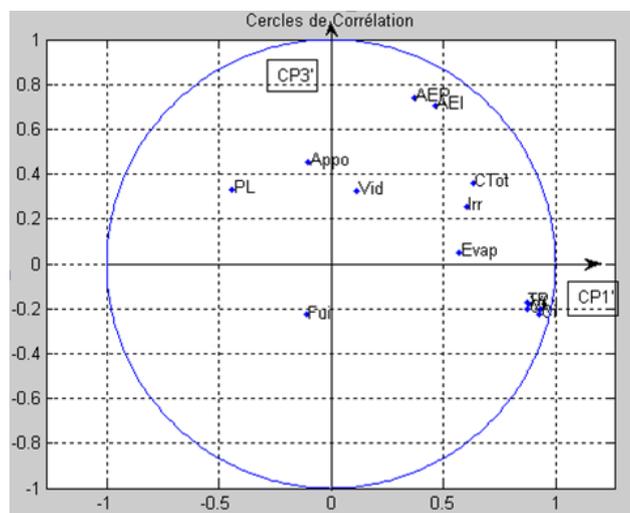
Annexe I-3-5 : Cercle de corrélation des CP1' et CP3' : gestion rationnelle



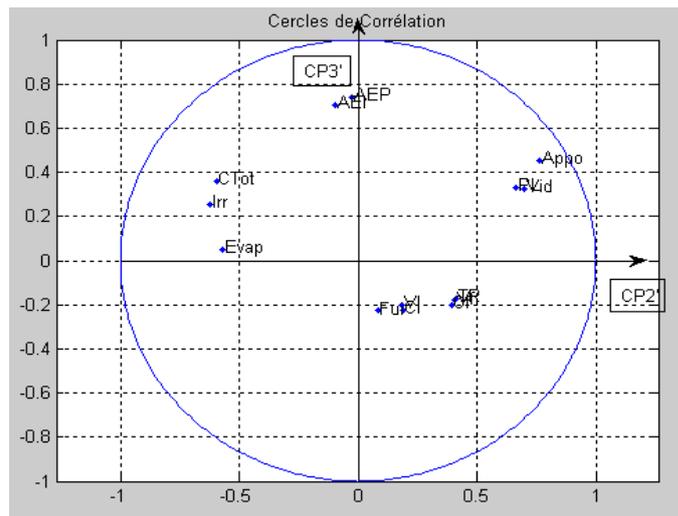
Annexe I-3-6 : Cercle de corrélation des CP2' et CP3' : gestion rationnelle



Annexe I-3-7 : Cercle de corrélation des CP1' et CP3' : gestion par AG



Annexe I-3-8 : Cercle de corrélation des CP2' et CP3' : gestion par AG

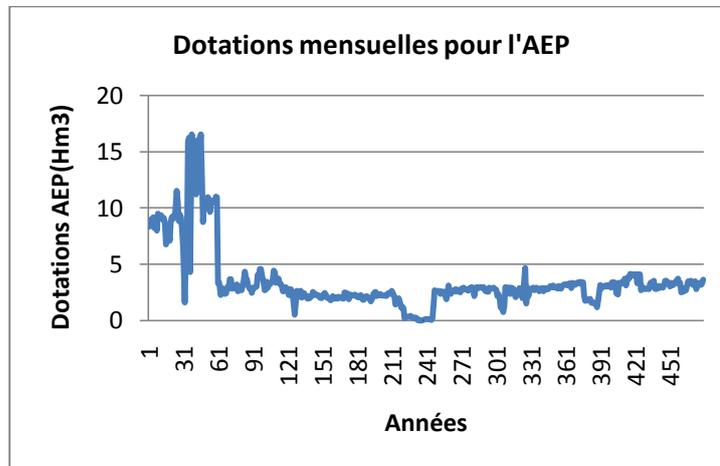


Annexes II : Gestions

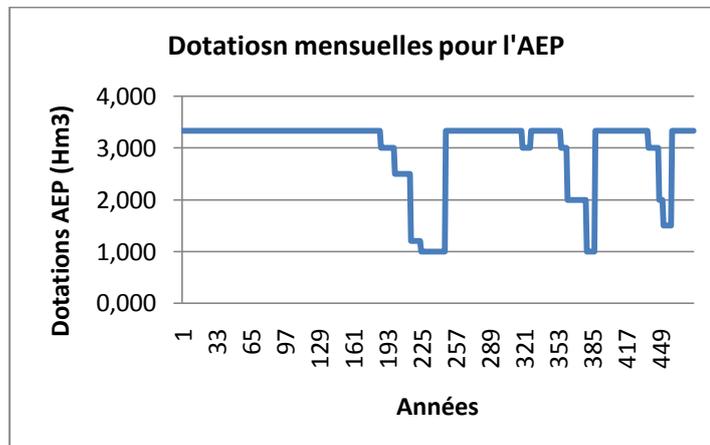
Annexe II-1 : Dotations mensuelles

Annexe II-1-1: Secteur de l'AEP

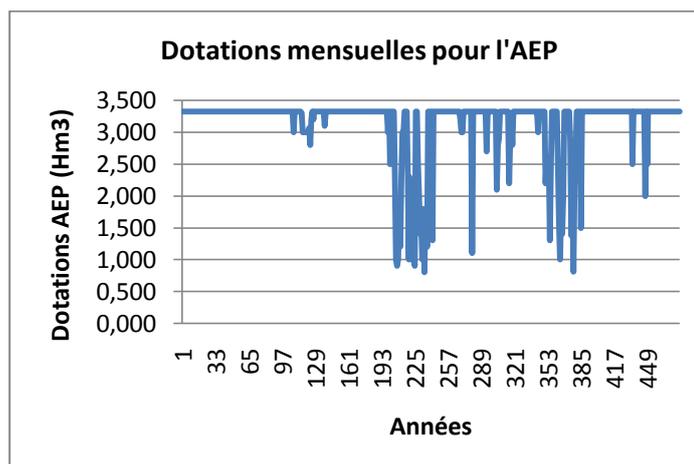
Annexe II-1-1-1 : Gestion réelle.



Annexe II-1-1-2 : Gestion manuelle.

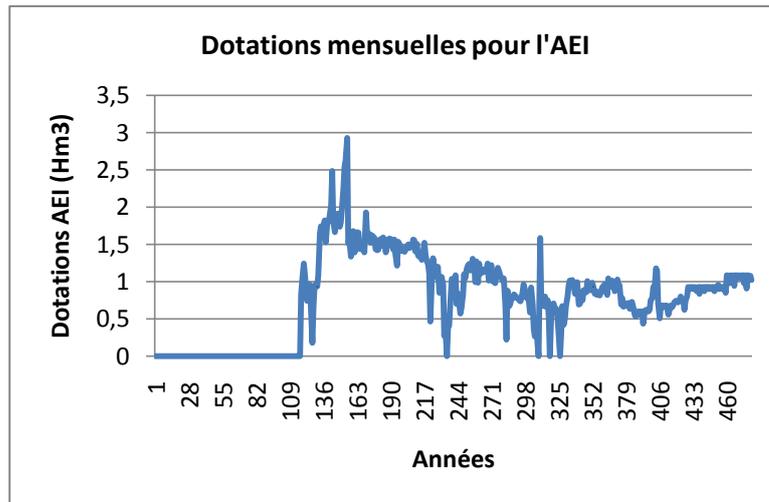


Annexe II-1 -1-3 : Gestion par AG.

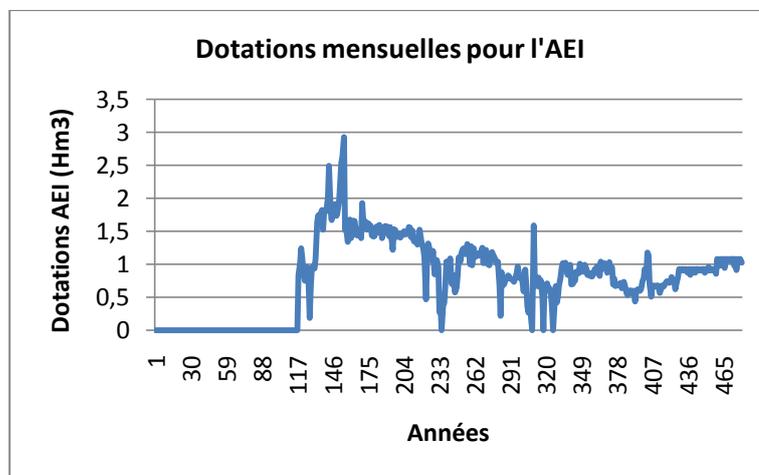


Annexe II-1-1: Secteur de l'AEI

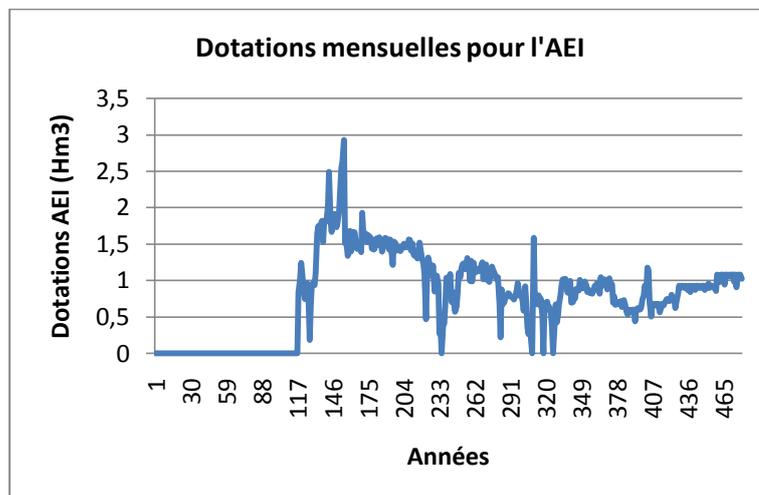
Annexe II-1-1-1 : Gestion réelle.



Annexe II-1-1-2 : Gestion manuelle.

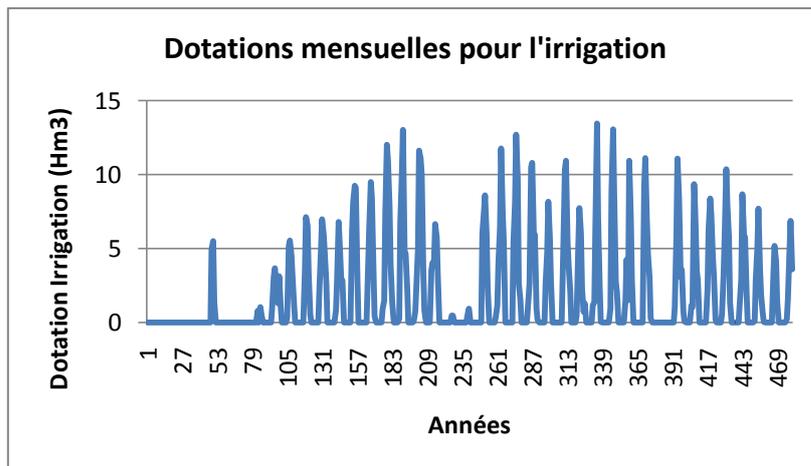


Annexe II-1-1-3 : Gestion par AG.

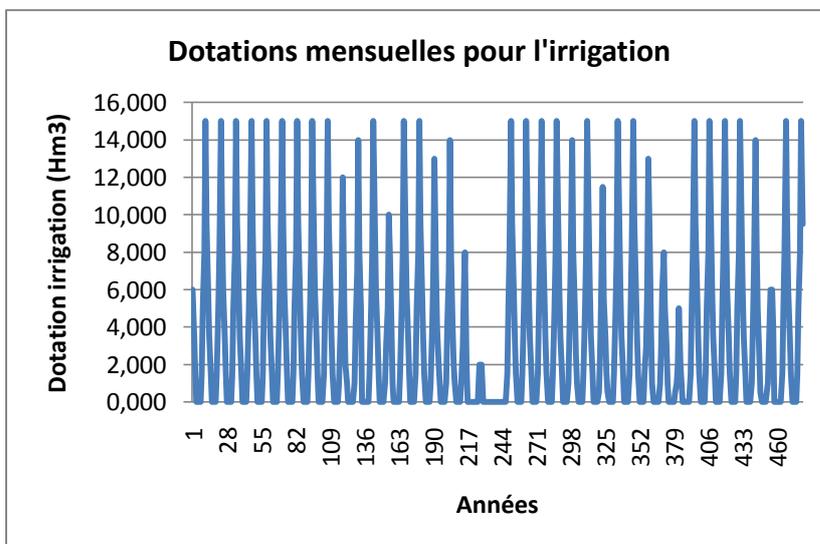


Annexe II-1-1: Secteur de l'irrigation

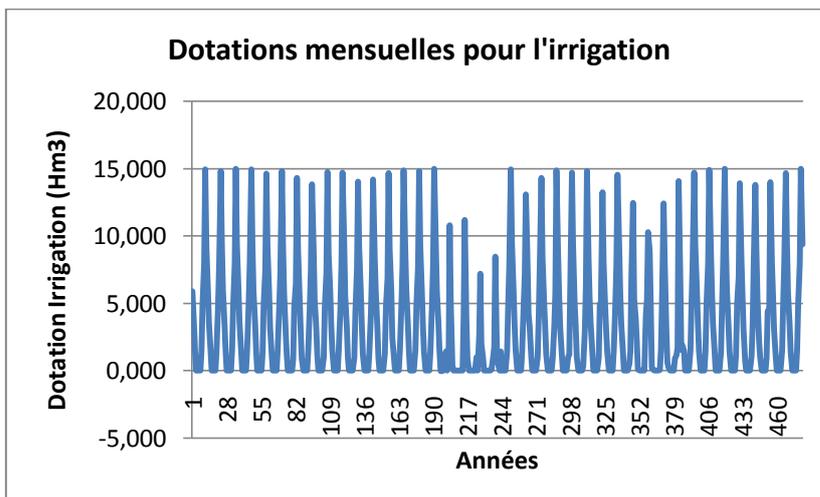
Annexe II-1-1-1 : Gestion réelle.



Annexe II-1-1-2 : Gestion manuelle.



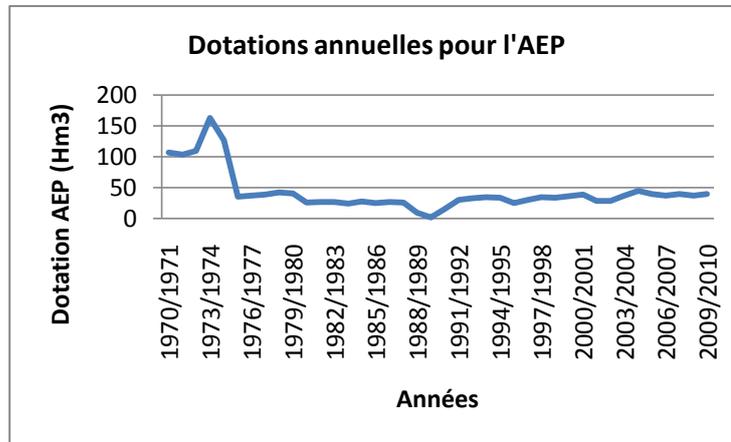
Annexe II-1 -1-3 : Gestion par AG.



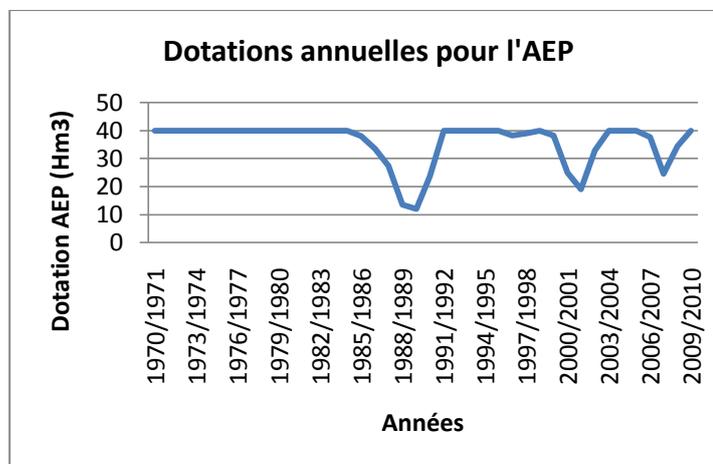
Annexe II-1 : Dotations annuelles

Annexe II-1-1: Secteur de l'AEP

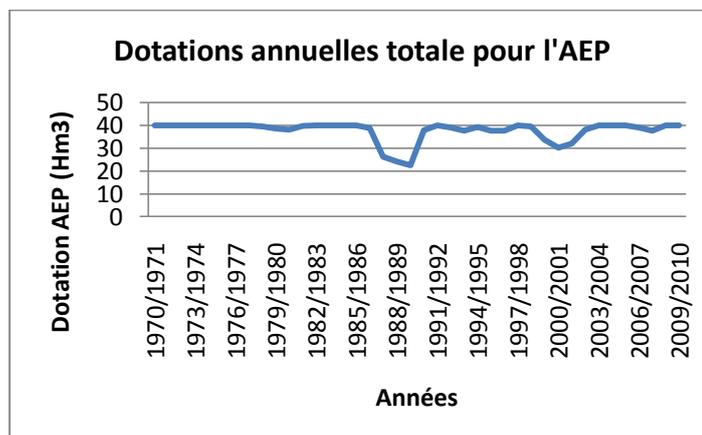
Annexe II-1-1-1 : Gestion réelle.



Annexe II-1-1-2 : Gestion manuelle.

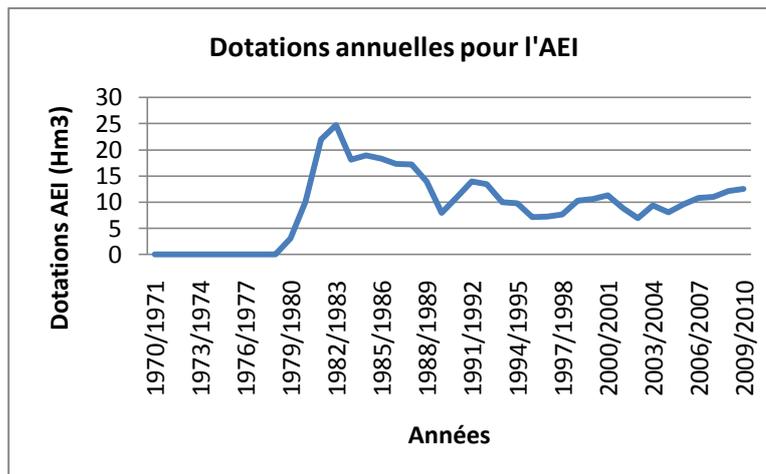


Annexe II-1 -1-3 : Gestion par AG.

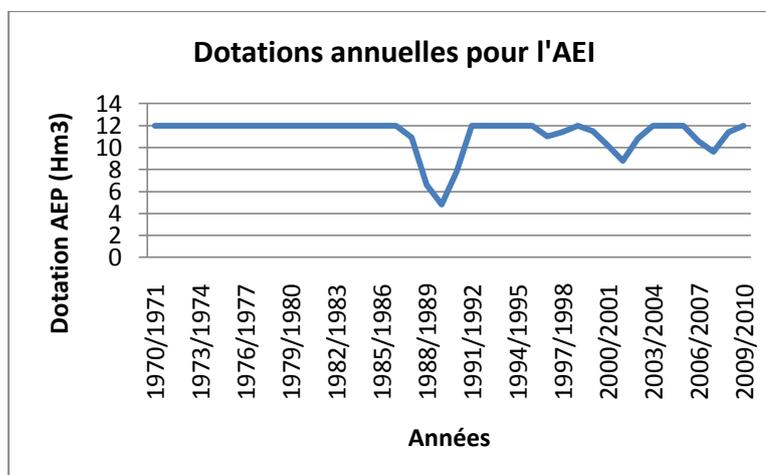


Annexe II-1-1: Secteur de l'AEI

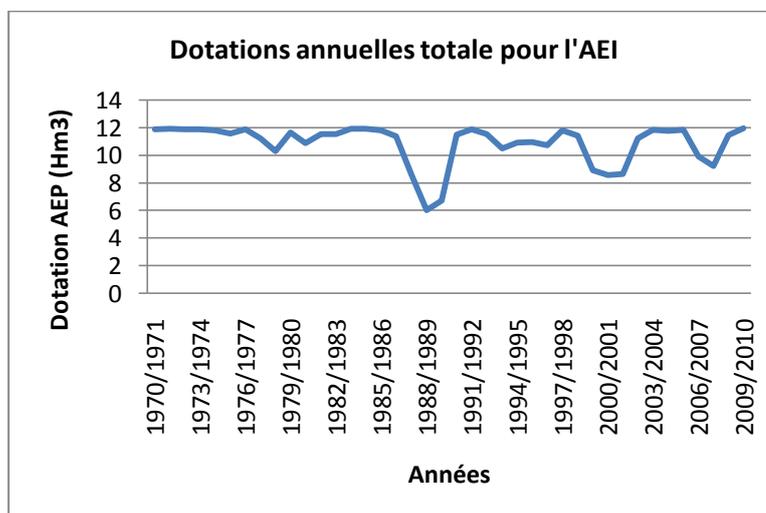
Annexe II-1-1-1 : Gestion réelle.



Annexe II-1-1-2 : Gestion manuelle.

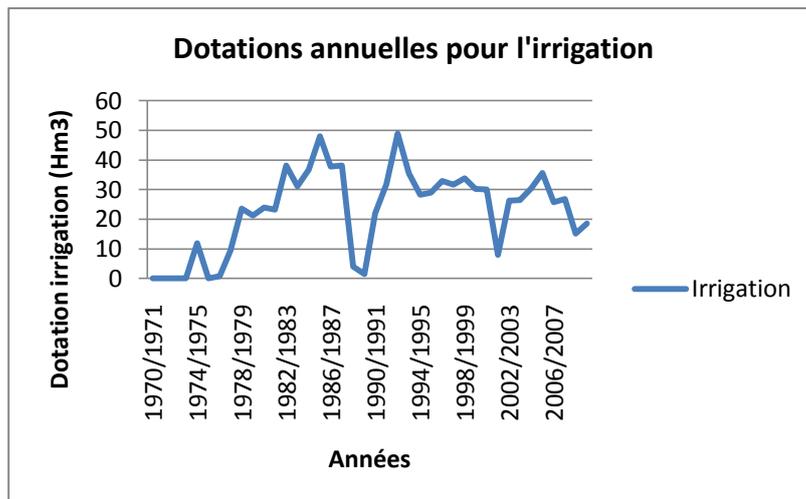


Annexe II-1 -1-3 : Gestion par AG.

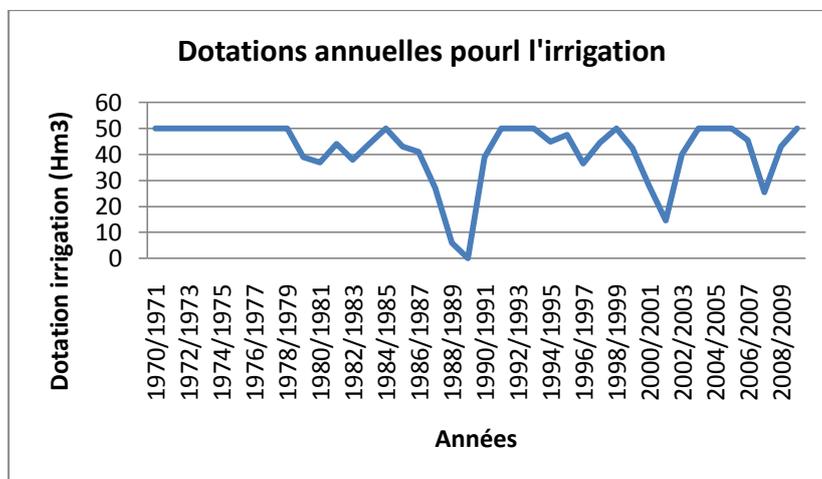


Annexe II-1-1: Secteur de l'irrigation

Annexe II-1-1-1 : Gestion réelle.



Annexe II-1-1-2 : Gestion manuelle.



Annexe II-1 -1-3 : Gestion par AG.

