

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية العليا للعلوم الفلاحية

-الحراش-

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie

El Harrach – Alger

Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences agronomiques

Thème

**Contribution au développement de stratégies de
gestion optimale des barrages réservoirs et des
plans culturaux : Cas du barrage de la Cheffia.**

(El Taref- ALGERIE)

Présentée par : CHEKIRED-BOURAS Fatma Zohra

Devant le jury :

Président :	AIDAOUI Abdellah	(Professeur - ENSA-El-Harrach)
Directrice de thèse :	SOUAG Doudja	(Maître de conférence A-USTHB)
Co-directeur de thèse :	CHABACA M.N.	(Professeur - ENSA-El-Harrach)
Examineurs :	ABBAS Leila	(Professeur- USTHB)
	AMARA Mahfoud	(Professeur- ENSA-El Harrach)
	MOUZAI El yatim	(Professeur- USTHB)
	LEKHAL N. (invité)	(Directeur- ONID)

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciements

Arrivée au terme de la rédaction de cette thèse, 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 à ma directrice de thèse M^{me} SOUAG D. Maître de conférence à l'université des sciences et technologies Houari Boumédiène (USTHB), pour sa patience, son esprit scientifique et rigoureux, et ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier M^r DECHEMI N. Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique qui m'a été d'une grande efficacité dans la réflexion et la structuration de ce travail.

J'exprime également mes remerciements à M^r CHABACA M.N., Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA), pour m'avoir fait l'honneur de co-diriger cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à M^r le président AIDAOUI A. Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA) et les membres de jury M^{me} ABBAS L. Professeur à USTHB, M^r AMARA M. Professeur à ENSA-El Harrach et M^r MOUZAI Y. Professeur à USTHB, qui m'ont fait un grand honneur d'avoir accepté de juger ce travail et de l'enrichir davantage par leurs remarques, critiques et conseils.

Je tiens sincèrement à remercier M^r LEKHAL N. Directeur des études à l'ONID, pour son aide précieuse au moment de la finalisation de cette thèse, qui a permis d'enrichir ce travail par ses remarques pertinentes et je le remercie d'avoir accepté l'invitation

Mes remerciements sont adressés à tous les cadres de l'ONID de la Wilaya d'El Taref et la DSA d'Annaba en particulier M^r SABRI et M^{me} Narimène qui n'ont cessé de me rendre service tout au long de mon séjour sur le terrain, sans oublier le chef d'exploitation du barrage de la Cheffia M^r SOUANI pour son aide et sa disponibilité.

Je tiens à adresser également mes sincères remerciements à tous les agriculteurs du périmètre de Bounamoussa.

J'adresse également ma respectueuse reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à mon travail et que je n'ai pas cités.

Enfin, j'adresserai une attention toute particulière à mon époux qui a su m'encourager, me motiver, m'aider et surtout me supporter... à chaque instant durant ce parcours de thèse. Je finirai par remercier chaleureusement mes parents, mes enfants, tous les membres de ma famille ainsi que mes amis et en particulier Ma chère ami Fatiha pour sa bonne humeur et son efficacité et pour son aide.

Sans vous, cela aurait certainement été beaucoup plus difficile. Merci de tout mon coeur...

*À mes parents, mon époux et mes enfants,
sans oublier tous ceux que j'aime.*

Liste des tableaux

Tableau II.1. Caractéristiques de la digue du barrage de la Cheffia.....	40
Tableau II.2. Caractéristiques des ouvrages de prise du barrage de la Cheffia.....	41
Tableau II.3. Représentation des valeurs des crues.....	44
Tableau II.4. Evapotranspiration en <i>mm</i> par mois.....	45
Tableau II.5. Résumé des caractéristiques du barrage de la Cheffia.....	46
Tableau II.6. Caractéristiques des stations du sous-bassin de la Cheffia.....	48
Tableau II.7. Données du barrage de la Cheffia.....	49
Tableau II.8. Résultats du Test de Grubbs et Beck.....	51
Tableau II.9. Résultats du Wilcoxon-Mann-Withney.....	52
Tableau II.10. Résultats du test de Wald-Wolfowitz.....	53
Tableau III.1. Caractéristiques de l'analyse des apports par groupement de variables.....	54
Tableau III.2. Probabilités des allocations annuelles respectivement pour chaque secteur AEP, AEI, et Irrigation.....	61
Tableau III.3. Probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus.....	61
Tableau III.4. Probabilités des allocations annuelles totales, pour la gestion historique.....	62
Tableau III.5. Probabilités des allocations annuelles de chaque secteur pour la gestion historique.....	62
Tableau III.6. Demande maximale des trois secteurs (AEP, AEI et Irrigation).....	65
Tableau III.7. Demande minimale des trois secteurs (AEP, AEI et Irrigation).....	65
Tableau III.8. Comparaison des Probabilités annuelles globales des gestions : historique et bilan d'eau.....	68
Tableau III.9. Comparaison des Probabilités annuelles pour chaque secteur des gestions : historique et bilan d'eau.....	69
Tableau IV.1. Probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus pour l'historique.....	76
Tableau IV.2. Probabilités des allocations annuelles de chaque secteur pour l'historique....	77
Tableau IV.3. Taux de satisfactions annuels de la gestion 11.....	81
Tableau IV.4. Mois de défaillance lors de la gestion 11.....	81
Tableau IV.5. Taux de satisfactions annuels de la gestion 12.....	82
Tableau IV.6. Taux de satisfactions annuels de la gestion 21.....	83
Tableau IV.7. Taux de satisfactions annuels de la gestion 22.....	83
Tableau IV.8. Taux de satisfactions annuels de la gestion 3.....	83
Tableau IV.9. Taux de satisfactions annuels de la gestion 4.....	84
Tableau IV.10. Résultats des taux de satisfactions des gestions entre 2000 et 2010.....	84
Tableau IV.11. Probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus pour l'historique.....	86
Tableau IV.12. Probabilités des allocations annuelles de chaque secteur pour l'historique.....	87
Tableau IV.13. Comparaison des probabilités des allocations annuelles de chaque secteur pour les trois gestions.....	87

Tableau IV.14. Comparaison des probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus obtenues par la programmation dynamique et l’algorithme génétique.....	89
Tableau IV.15. Comparaison des Probabilités annuelles pour chaque secteur des gestions par la programmation dynamique et l’algorithme génétique.....	90
Tableau IV.16. Résultat de calcul des indices de performance par les deux méthodes de gestion.....	92
Tableau V.1: Coefficient de pondération des pluies des stations pluviométriques considérées.....	103
Tableau V.2 : Paramètres du modèle GR2M appliqué sur les pluies pondérées.....	103
Tableau V.3 : Critères numériques de validation du modèle GR2M utilisant la pluie pondérée.....	104
Tableau V.4 : Coefficients de déterminations et de corrélations entre débits et pluies observés de chaque station.....	105
Tableau V.5 : Paramètres du modèle GR2M appliqué sur les pluies du pluviomètre du barrage.....	106
Tableau V.6 : Critères numériques de validation du modèle GR2M utilisant les pluies du pluviomètre du barrage.....	107
Tableau V.7 : Critères de validation du scénario obtenu par les chaînes de Markov.....	110
Tableau V.8 : Pénalités des allocations annuelles des trois secteurs confondus pour le scénario futur.....	113
Tableau V.9 : Pénalités des allocations annuelles de chaque secteur pour le scénario Futur.....	114
Tableau V.10 : Calcul des valeurs des neurones de sorties.....	116
Tableau V.11 : Coefficients de détermination pour les trois secteurs en période de calage et de validation issues du modèle des réseaux de neurones.....	116
Tableau V.12: Comparaison des pénalités annuelles des trois secteurs pour les répartitions par le bilan d’eau et par Réseaux de Neurones.....	118
Tableau V.13 : Moyennes des taux de satisfactions annuels des trois secteurs pour les répartitions : par le bilan d’eau et par RN.....	121
Tableau VI.1. Répartition des terres assolées et plantées dans le périmètre de la première phase.....	134
Tableau VI. 2. L’occupation du sol du Secteur socialiste	
Tableau VI.3. L’occupation du sol du secteur privé.....	135
Tableau VI.4. Le volume théorique moyen affecté à l’irrigation.....	137
Tableau VI.5. La répartition des cultures au niveau du périmètre irrigué.....	138
Tableau VI.6. Les plans culturaux optimaux pour les différents types d’années (AH,AM,AS).....	142
Tableau VI.7. Les consommations en eau et les revenus bruts pour les différents types d’années climatiques (AH,AM,AS).....	155

Liste des figures

Figure I.1. Les principaux éléments de la gestion du système S.....	6
Fig.I.2. (a) Schéma de principe de la mesure de la performance d'un système de gestion (b) Schéma de principe de l'estimation de la performance d'un système modélisé via un modèle de gestion.....	12
Figure I.3. Représentation graphique de la programmation dynamique.....	21
Figure I.4. Classification des métaheuristiques.....	23
Figure I.5. Modèle de la roulette.....	27
Figure I.6. Croisement à un point.....	29
Figure I.7. Croisement à multi- points.....	30
Figure I.8. Croisement à uniforme.....	30
Figure I.9. La mutation.....	31
Figure I.10. Boucle générationnelle.....	31
Figure II.1. Présentation de la zone d'étude.....	42
Figure II.2. Moyennes mensuelles inter annuelles des apports au barrage en Mm^3	44
Figure II.3. Moyennes mensuelles inter- annuelles des pluies en mm.....	45
Figure III.1. Représentation des apports annuels historiques.....	53
Figure III.2. Analyse des vidanges annuelles historiques.....	55
Figure III.3. Représentation des allocations annuelles historiques pour l'AEP.....	56
Figure III.4. Représentation des allocations annuelles historiques pour l'irrigation.....	56
Figure III.5. Représentation des allocations annuelles historiques pour l'AEI.....	57
Figure III.6. Représentation des allocations annuelles historique des trois secteurs.....	58
Figure III.7. Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'AEP.....	58
Figure III.8. Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'AEI.....	59
Figure III.9. Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'Irrigation.....	59
Figure III.10. Cercle de corrélation CP1' et CP2' des 14 paramètres de la gestion passée....	60
Figure III.11. Variation du taux de satisfaction annuel total de la gestion historique.....	63
Figure III.12. Surfaces en fonction des volumes.....	66
Figure III.13. Les côtes en fonction des volumes.....	67
Figure III.14. Comparaison des taux de satisfactions annuels des gestions historique et par le bilan d'eau.....	69
Figure III.15. Cercle de corrélation CP1'-CP2' de la gestion par le bilan d'eau.....	70
Figure IV.1. Taux de satisfaction annuel de la gestion de l'historique par PDD pour les trois secteurs confondus.....	75
Figure IV.2. Taux de satisfaction annuel global des trois gestions (historique, bilan d'eau et par PDD).....	76
Figure IV.3. Taux de satisfaction des gestions entre 2000 et 2010.....	84
Figure IV.4. Taux de satisfaction annuel de la gestion de l'historique par AG pour les trois secteurs confondus.....	85

Figure IV.5. Taux de satisfaction annuel global des trois gestions (historique, bilan d'eau et par AG).....	86
Figure IV.6. Cercle de corrélation de la CP1' et CP2' pour la gestion par AG.....	88
Figure IV.7. Comparaison des taux de satisfactions annuels des gestions par PDD et AG....	89
Figure V.1: Représentation de l'évolution des paramètres hydrologiques dans le temps.....	96
Figure V.2 : Représentation des étapes du modèle (Source : Moulehi et al. (2006)).....	96
Figure V.3 : Représentation des zones d'influence des stations pluviométriques.....	102
Figure V.4. : Calage des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M.....	103
Figure V.5 : Validation des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M.....	104
Figure V.6: Corrélations entre débits observés et débits simulés issus du modèle GR2M utilisant la pluie pondérée.....	105
Figure V.7. : Calage des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.....	106
Figure V.8 : Validation des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.....	107
Figure V.9 : Corrélation entre débits historiques et simulés par le modèle GR2M appliqué au pluviomètre du barrage.....	108
Figure V.10: Cercle de corrélation de la CP1' à la CP2' pour les débits mensuels.....	109
Figure V.11 : Représentation dans le temps des pluies historiques et simulées par le modèle markovien multi-classes (pluviomètre barrage).....	111
Figure V.12 : Représentation dans le temps des débits historiques et simulés par le modèle GR2M.....	111
Figure V.13 : Représentation des apports moyens annuels du scénario.....	112
Figure V.14 : Taux de satisfaction annuel du scénario simulé pour les trois secteurs confondus.....	113
Figure V.15 : Corrélation entre allocations par le bilan d'eau et allocations simulées par les Réseaux de Neurones pour l'AEP.....	117
Figure V.16 : Corrélation entre allocations par le bilan d'eau et allocations simulées par les Réseaux de neurones pour l'Irrigation.....	117
Figure V.17 : Corrélation entre allocations par le bilan d'eau et allocations simulées par les Réseaux de Neurones pour l'AEI.....	117
Figure V.18 : Comparaison des allocations de l'AEP par les modèles de répartition : le bilan d'eau et les réseaux de neurones.....	119
Figure V.19 : Comparaison des allocations de l'Irrigation par les modèles de répartition par le bilan d'eau et par les réseaux de neurones.....	119
Figure V.20 : Comparaison des allocations de l'AEI par les modèles de répartition par le bilan d'eau et par les Réseaux de neurones.....	119
Figure V.21 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de répartition par le bilan d'eau.....	120
Figure V.22 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de répartition par les Réseaux de Neurones.....	120
Figure VI.1. Les secteurs du périmètre Bounamoussa.....	138
Figure VI.2. Evolution des superficies irriguées pendant les 40 dernières années.....	139
Figure VI.3. L'occupation actuelle du périmètre.....	141
Figure VI.4. Evolution de la consommation en eau du périmètre.....	143
Figure VI.5. Le réseau d'irrigation dans le périmètre de Bounamoussa.....	146
Figure.VI.6. Comparaison entre les superficies : actuelles, initiales et optimisés.....	157



LISTE DES ABREVIATIONS

- PDD** : Programmation dynamique déterministe.
- IP** : Indice de performance.
- GAMS** : General Algebraic Modelling System.
- SGA** : Algorithme génétique simple.
- ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydriques.
- ANBT** : Agence Nationale des Barrages et Transferts.
- AGID** : Agence de l'irrigation et de drainage.
- AEP** : Alimentation en eau potable.
- AEI** : Alimentation en eau industrielle.
- IRR** : Irrigation.
- ACP** : L'analyse en composantes principale.
- LP** : La programmation linéaire.
- NPL** : La programmation non linéaire.
- AG** : Les algorithmes génétiques.
- ONID** : Office National de l'Irrigation et de Drainage.
- OPI** : Office des périmètres irrigués.
- D.A.S** : domaines agricoles socialistes.
- EAI** : Exploitations agricoles individuelles.
- EAC** : Exploitations agricoles collectives.
- RESOPTI** : Reservoir optimization
- RN** : Réseau de neuronne

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

RÉSUMÉ

ABSTRACT

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....1

Problématique

Organisation de la thèse

CHAPITRE I : THEORIE ET RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction.....	5
I.2. Ressources en eau.....	5
I.3. Gestion des ressources en eau : origines et définitions.....	6
I.4. Principes de la gestion de l'eau.....	7
I.4.1 Gestion intégrée, gestion par l'offre et par la demande.....	8
I.4.2. Aspects de la notion de ressource en eau.....	9
I.4.3. Variabilité des ressources en eau.....	9
I.5. Ressources en eau en Algérie.....	10
I.6. Gestion des barrages réservoirs.....	10
I.6.1. Objectifs des réservoirs.....	10
I.6.1.1. Régulation des débits d'apports.....	10
I.6.1.2. Desserte en eau d'irrigation.....	10
I.6.1.3. Alimentation en eau potable.....	11
I.6.1.4. Production d'énergie électrique.....	11
I.6.1.5. Maintien d'un niveau écologique minimum.....	11
I.6.1.6. Navigation.....	11
I.7. Gestion du risque.....	11
I.7.1. Incertitudes stratégiques.....	11
I.7.2. Incertitudes physiques.....	12
I.7.3. Incertitudes technologiques.....	12
I.8. Prévision des apports.....	12
I.9. Evaluation de la performance d'une gestion.....	12
I.10. Importance de l'optimisation dans la gestion de la ressource en eau.....	16
I.10.1. Notion d'optimisation.....	18
I.10.2. Formulation mathématique.....	19
I.10.3. Méthodes d'optimisation.....	20
I.10.3.1. Programmation non linéaire (on-linear programming - NLP).....	21
I.10.3.2 Programmation dynamique (dynamic programming).....	21
I.10.3.2.1. Principe.....	22
I.10.3.2.2. Eléments de la programmation dynamique.....	22
I.10.3.2.3. Application de la programmation dynamique pour l'optimisation de la gestion de la ressource.....	23
I.10.3.3. Métaheuristiques.....	23

I.10.3.3.1. Algorithmes génétiques.....	24
I.10.3.3.2. Théorie et historique des Algorithmes Génétiques.....	25
I.10.3.3.3. Principe général d'un Algorithme Génétique Simple.....	26
I.10.3.3.3.1. Création de la population initiale.....	26
I.10.3.3.3.2. Opérateurs de sélection.....	27
I.10.3.3.3.3. Opérateurs de variation.....	29
I.10.3.3.3.4. Opérateurs de croisement.....	30
I.10.3.3.3.5. Opérateurs de mutation.....	31
I.10.3.3.3.6. Boucle générationnelle.....	32
I.10.3.3.3.7. Fonction de performance.....	32
I.10.3.3.3.8. Pénalités.....	33
I.10.3.3.3.9. Application des algorithmes génétiques pour l'optimisation de la gestion de la ressource.....	34
CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	
II.1. Introduction.....	38
II.2. Historique des travaux.....	39
II.3. Ouvrages.....	39
II.3.1. Digue.....	39
II.3.2. Evacuateur principal.....	39
II.3.3. Vidange de fond.....	39
II.3.4. Ouvrages de prise.....	40
II.4. Caractéristiques du bassin versant.....	40
II.4.1. Aperçu sur le Bassin de Mefragh.....	40
II.4.2. Relief du bassin versant.....	41
II.4.3. Géologie du Bassin Versant.....	41
II.4.4. Couverture végétale.....	42
II.4.5. Neige.....	42
II.5. Régime des apports de la Bounamoussa au barrage de la Cheffia.....	42
II.5.1. Description de l'Oued.....	42
II.5.2. Régimes de l'Oued.....	42
II.5.3. Fréquence des crues.....	43
II.6. Hydrologie du site.....	43
II.6.1. Pluies.....	43
II.6.2. Evaporation.....	44
II.6.3. Transport Solide.....	44
II.7. Alimentation en eau de la ville d'Annaba.....	45
II.8. Industrie.....	46
II.9. Périmètre de la Bounamoussa.....	46
II.10. Données prises en compte dans l'étude.....	47
II.11. Problèmes de données.....	48
II.11.1. Comblement des lacunes.....	48
II.11.2. Détection des valeurs douteuses (Test de Grubbs et Beck).....	49
II.11.3. Critique des données.....	50
II.11.3.1. Test d'homogénéité (Wilcoxon-Mann-Withney).....	50

II.11.3.2 Test d'indépendance (Wald-Wolfowitz).....	51
---	----

CHAPITRE III : ANALYSE DE LA GESTION EXISTANTE DU BARRAGE

III.1. Introduction.....	53
III.2. Analyse des apports.....	53
III.3. Analyse des vidanges.....	55
III.4. Analyse des allocations annuelles.....	55
III.4.1. Allocation pour l'AEP.....	55
III.4.2. Allocation pour l'irrigation.....	56
III.4.3. Allocation pour l'industrie.....	57
III.4.4. Consommation totale.....	58
III.5. Analyse des allocations mensuelles.....	58
III.6. Analyse des données par la méthode de l'ACP.....	59
III.6.1 Application de l'ACP sur les paramètres du barrage.....	60
III.7. Critique de la gestion réelle ou historique.....	61
III.8. Gestion par le bilan d'eau.....	63
III.8.1. Equation de continuité.....	63
III.8.1.1. Détermination des allocations des trois secteurs.....	64
III.8.1.1.1. Demande maximale.....	64
III.8.1.1.2. Demande minimale.....	65
III.8.1.2. Calcul du volume d'eau évaporé du barrage.....	66
III.8.1.3. Calcul des côtes d'eau dans le barrage.....	66
III.8.1.4. Calcul du volume d'eau vidangé.....	67
III.8.1.5. Calcul de la consommation totale.....	67
III.9. Analyse de la gestion par le bilan d'eau.....	67
III.9.1. Comparaison de la simulation des gestions : bilan d'eau et historique.....	68
III.10. Conclusion.....	70

CHAPITRE IV : OPTIMISATION DE LA GESTION DU BARRAGE DE LA CHEFFIA PAR DEUX METHODES : LA PROGRAMMATION DYNAMIQUE ET LES ALGORITHMES GENETIQUES

IV.1. Introduction.....	72
IV.2. Optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par la méthode de la programmation dynamique déterministe discrète (PD.D).....	72
IV.2.1. Présentation de la méthode utilisée.....	72
IV.2.2. Optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par le module RESOPTI.....	74
IV.2.3. Gestion de l'historique par la programmation dynamique déterministe discrète.....	75
IV.3. Optimisation de la gestion historique par les Algorithmes génétiques.....	77
IV.3.1. Programmation des Algorithmes Génétiques.....	77
IV.3.1.1. Nature des individus.....	77
IV.3.1.2. Fonction objectif.....	77
IV.3.1.3. Détermination de la demande.....	78

IV.3.1.4. Détermination des volumes d'eau dans la réserve.....	78
IV.3.1.5. Pénalités et fitness fonction.....	79
IV.3.1.6. Sélection pour la reproduction.....	79
IV.3.1.7. Croisement.....	79
IV.3.1.8. Mutation.....	80
IV.3.1.9. Sélection pour le remplacement.....	80
IV.3.1.10. Taille de la population et nombre de générations.....	80
IV.3.2. Test de l'algorithme génétique entre 2000-2010.....	81
IV.3.3. Gestion des 40 années par AG.....	85
IV.4. Comparaison des deux gestions (PDD et AG).....	88
IV.4.1. Comparaison des probabilités et des taux de satisfaction.....	88
IV.4.2. Comparaison des indices de performance des deux gestions (AG et PDD).....	91
IV.5. Conclusion.....	95
CHAPITE V : SIMULATION ET OPTIMISATION FUTURE	
V.1. Introduction.....	96
V.2. Nécessité d'utilisation d'un modèle de simulation.....	96
V.2.1. Utilisation du modèle GR2M.....	97
V.2.1.1. Critère de validation du modèle.....	99
V.2.1.2. Paramètres du modèle.....	100
V.2.2. Simulation des pluies.....	100
V.2.2.1. Une pluie représentative du bassin versant.....	100
V.2.2.1.1. Méthode de la moyenne arithmétique.....	101
V.2.2.1.2. Méthode des polygones de Thiessen.....	101
V.2.2.1.3 Méthode des isohyètes.....	102
V.2.2.2. Application du modèle GR2M sur la pluie pondérée.....	103
V.2.2.3. Application du modèle GR2M sur la pluie du pluviomètre du barrage.....	109
V.2.3. Simulation des pluies par les modèles markovien multi-classes.....	109
V.2.4. Simulation des débits par les modèles GR2M.....	111
V.3. Gestion future.....	112
V.4. Amélioration du modèle par les réseaux de neurones artificiels.....	115
V.4.1. Elaboration du modèle des réseaux de neurones.....	115
V.4.2. Résultats du modèle des réseaux de neurones.....	116
V.5. Conclusion.....	122
CHAPITRE VI : OPTIMISATION DU PLAN CULTURAL	
VI.1. Introduction.....	123
VI.2. Présentation du périmètre.....	123
VI.2.1. Etat initial du périmètre.....	124
VI.2.1.1. Structures foncières.....	124
VI.2.1.2. Occupation du sol et types d'assolement.....	125
VI.2.1.2.1. Secteur socialiste.....	125
VI.2.1.2.2. Secteur privé.....	126
VI.2.2. Etat actuel du périmètre.....	127
VI.2.2.1. Ressource en eau.....	128
VI.2.2.2. Mise en valeur agricole.....	128

VI.2.2.3. Superficies irriguées.....	129
VI.2.2.4. Répartition des cultures irriguées.....	130
VI.2.2.5. Besoin et ressources en eau du périmètre.....	132
VI.2.2.6. Climatologie.....	133
VI.2.2.7. Typologies des exploitations et variation agricole du périmètre.....	134
VI.2.2.8. Vocation agricole du périmètre.....	134
VI.2.2.9. Distribution de l'eau et mode d'irrigation au niveau du Périmètre.....	135
VI.2.2.10. Situation actuelle du périmètre de Bounammoussa.....	136
VI.3. Revue bibliographique sur l'optimisation des plans culturaux.....	138
VI.4. Problématique et méthodologie de travail.....	140
VI.4.1. Problématique du périmètre.....	140
VI.4.2. Méthodologie de travail.....	141
VI.4.2.1 Détermination des besoins en eau : modèle agro-climatique.....	142
VI.4.2.1.1.Détermination des années types.....	142
VI.4.2.1.2.Calcul des besoins en eau pour les trois types d'année.....	142
VI.4.2.2. Modélisation du plan cultural : modélisation bio-économique.....	142
VI.5. Proposition du plan cultural optimal pour chaque type d'année.....	144
VI.6. Conclusion.....	148
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	149
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	
<i>ANNEXES</i>	

Introduction générale

L'eau joue un rôle crucial dans le développement économique des pays et dans la survie des écosystèmes naturels. Les diverses utilisations de l'eau influent sur la disponibilité de point de vue de la qualité et de la quantité.

En Afrique, comme dans beaucoup de régions de monde, le développement de la gestion des ressources en eau a été entravé par la pénurie de celles-ci : les lacunes du cadre politique, le manque de connaissance et d'information et l'insuffisance des moyens institutionnels. Cette situation se traduit par un processus de prise de décisions non coordonné et fragmentée ainsi qu'une mauvaise gestion des ressources en eau (O.C.O.D, 2000). Cela impose donc l'élaboration et la définition d'une stratégie de gestion de l'eau à moyen et à long terme.

S'ajoute à cela, les pénuries des ressources en eau qui s'accroissent de plus en plus, l'augmentation de la demande en eau accroît les situations de surexploitation de la ressource en eau, ce qui place sa gestion au centre des préoccupations actuelles et lui confère une attention particulière dans le monde de la recherche, en effet, la demande accrue liée à la croissance démographique rapide pèse lourdement sur les ressources en eau d'où plusieurs pays sont confrontés au stress hydrique.

Aujourd'hui, l'Algérie se classe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, à dominance semi-aride et où l'eau est au cœur des préoccupations de la société et des pouvoirs publics qui lui consacrent des moyens de plus en plus importants. La construction de nouveaux barrages, la réalisation de grands transferts régionaux et grandes adductions urbaines et agricoles, des usines de dessalement ont permis d'augmenter nettement le volume des ressources en eau mobilisées et d'améliorer les conditions d'approvisionnement des régions et des agglomérations déficitaires.

Par ailleurs, toute mise en valeur hydro-agricole doit tenir compte de cette variété même s'il est vrai que l'irrigation est nécessaire quelque soit la situation géographique, pour faire face au déficit hydrique des mois « secs » et aux irrégularités interannuelles des pluies.

Cependant, l'efficacité de ces efforts reste limitée parce que le service de l'eau est encore imparfait dans la plupart des villes, les irrigations dans les grands périmètres ne progressent pas et les pollutions menacent les nappes souterraines dans plusieurs zones. De plus, des volumes importants sont perdus dans les réseaux de distribution d'eau (urbains, et d'irrigation). Les ressources hydrauliques naturelles de l'Algérie dépendent essentiellement

de deux paramètres déterminants : pluviométrique (conditionnant l'alimentation en eau des rivières) et évaporométrique (pertes ou retour de l'eau à l'atmosphère).

La pluviométrie qui est très inégalement répartie sur le territoire et caractérisée par de fortes irrégularités intra-annuelles et inter-annuelles. L'Est algérien est la région la plus variée du pays sur le plan climatique. Aussi, tout bilan hydrologique se trouve-t-il directement influencé par les nuances du climat. En outre, les précipitations étant, en moyenne, deux fois plus importantes à l'Est qu'à l'Ouest.(M. Benblida ; G. Thivet, 2010).

L'Algérie enregistre une dotation moyenne de 160 litres/jour/habitant alors que celle-ci devrait atteindre les 250 l/jour/habitant, et les choses vont en s'aggravant. Certains sont persuadés que ce déficit est dû à l'insuffisance des ressources, d'autres pensent que le problème réside dans la mauvaise gestion et maintenance de cette dernière et des infrastructures qui lui sont liées.

De plus, une très forte concurrence se développe entre les grands secteurs d'utilisation de l'eau, la demande en eau potable s'est considérablement accrue en volume et en proportion. Elle représentait 16% de la demande totale en 1975, elle a depuis plus que doublé et atteint actuellement la valeur de 35%. Durant la même période, la part de l'eau agricole est passée de 80% à 60%, celle de l'industrie gardant à peu près la même valeur de 3.5%.

Cependant, Le secteur hydro-agricole en Algérie fait face à de grandes difficultés d'ordre technique, financier et organisationnel. Sur l'ensemble des superficies équipées pour l'irrigation, la sécheresse qui a sévi au cours des dernières décennies explique partiellement le déficit de ressources en eau et la limitation des superficies irriguées dans l'ensemble du pays.

Ces derniers sont aggravés par de nombreux facteurs externes au secteur hydro-agricole : la faiblesse de la planification des ressources en eau liée au manque de coordination sectorielle et intersectorielle, les conflits avec les autres usages, l'absence d'outils pour établir des prévisions et définir des règles de gestion de la pénurie, s'ajoutent à cela, des facteurs internes tels que la dégradation de l'infrastructure par manque d'entretien, les importantes pertes dans les réseaux évaluées à plus de 40% en moyenne et les gaspillages liés au faible prix de l'eau agricole.(AGID, 2005).

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 nombreux travaux dans le monde ont été effectués jusque là, et les méthodes sont aussi nombreuses que différentes : de la programmation dynamique stochastique à la logique floue en passant par les réseaux neurones, elles ont toutes été appliquées dans le cadre de l'optimisation de la gestion de barrages réservoirs. 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.

Les deux années de sécheresse vécues à Annaba, en 1989-1990, et 2001-2002 (Années hydrologiques) que l'on pourrait qualifier de catastrophiques nous ont poussés à nous pencher sur la question de la gestion du barrage de la Cheffia, conçu pour alimenter la dite wilaya. Les volumes ayant atteint le volume mort pour la première année, et le volume minimal pour la seconde rendent le problème crucial, et l'on comprend facilement la nécessité de prévenir d'autres cas critiques qui pourraient survenir dans le futur si on ne corrigeait pas la situation. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail.

Pour ce faire, nous devons passer tout d'abord par la détermination des causes les plus probables de ce problème : Est-ce un problème quantitatif de la ressource en eau, ou alors un problème de gestion, qui peut être intuitive, ou tout simplement inadaptée ?

Une fois ces questions résolues et pour passer à l'optimisation, nous devons au préalable faire une simulation des apports, et ce, par l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales, et la simulation par les Chaines de Markov. Ceci nous permettrait aussi de faire une étude comparative entre les deux méthodes de simulation, afin d'en désigner la plus intéressante. Nous tenterons ensuite de définir une gestion optimale du barrage.

Ce travail pourrait alors faire progresser la compréhension tant dans le domaine de la gestion, que dans celui de l'optimisation de la gestion des barrages-réservoirs. Aussi, il permettrait de faire connaître davantage la méthode des Algorithmes génétiques et ouvrir la voie à d'autres travaux de recherche. 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 ; et à partir des données de l'irrigation obtenues par la simulation du barrage

dans le futur, nous allons développer trois scénarii (Humide, moyen et sec) pour déterminer le plan cultural optimal du périmètre irrigué de la Bounamoussa.

Cette thèse est articulée en six chapitres : D'un premier chapitre qui consiste en une recherche bibliographique portant sur la gestion des barrages réservoirs, et les méthodes d'optimisation utilisées à cette fin ; 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 des méthodes d'optimisation utilisées 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 ; L'étude du périmètre irrigué de la Bounamoussa sera développée, ainsi que l'intérêt du développement des scénarii pour une meilleure compréhension des évaluations futures sera présentée dans le chapitre six.

Nous terminerons ce travail de recherche par une conclusion générale et des recommandations soulignant l'importance et l'originalité du travail accompli, et proposant des améliorations futures des modèles.

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 devons trouver une règle de gestion qui réaliserait 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 de la gestion de la ressource en eau et les mesures requises pour la développer, la gérer et la protéger. Aussi, il faut présenter les 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. Ressources en eau

L'eau est un élément indispensable pour la vie et pour le développement socio-économique réel et durable d'un pays. Il est donc nécessaire d'avoir une meilleure connaissance sur les ressources en eau existantes dans le bassin versant, surtout les informations concernant les types de ressources en eau et leur potentialité ainsi que la vulnérabilité des ressources à un éventuel facteur.

Les ressources en eau commencent à se raréfier pour des multiples raisons : la mauvaise gestion des ressources existantes, le gaspillage dû à l'usage effréné de l'eau, la variation et le changement du climat. Une connaissance des ressources en eau disponible, des besoins des différents usagers et de leur modèle est nécessaire pour mieux gérer l'eau. Mais la gestion ne peut pas être intégrée et durable si on ne tient pas compte à la fois des différents types de ressources en eau et ceci dans leur système de gestion naturel ou leur bassin versant.

Dans ce contexte, une véritable évaluation des ressources en eau ainsi qu'une gestion de l'eau plus parcimonieuse, sont devenues impératives (Jonch-Clausen et al., 1996). La

gestion des ressources hydriques devrait maintenir l'équilibre entre les demandes croissantes et les ressources de moins en moins disponibles (Hubert, 1998).

En outre, la gestion des hydro-aménagements doit trouver le bon équilibre entre la ressource et l'usage, les apports sont directement liés aux aléas climatiques et au transfert d'eau par le bassin versant (Pabiot, 1999). A cet effet, il est largement reconnu et de plus en plus nécessaire de développer des méthodes d'aide à la décision mieux adaptées au contexte multi-acteurs dans le domaine de l'eau, afin d'assurer le développement durable des ressources en eau. L'aide à la décision pour la gestion de l'eau a longtemps mis l'accent sur la construction des modèles visant à éclairer les décisions gestionnaires.

Selon Sebari (2004), deux approches sont généralement utilisées pour la planification et la gestion des ressources en eau : l'optimisation qui se base sur des techniques mathématiques qui permettent d'obtenir la solution optimale par rapport à certains critères de performances que le système doit réaliser; et la simulation qui se base sur la reproduction du comportement du système étudié selon un schéma conceptuel et en adoptant certaines hypothèses simplificatrices. La simulation permet de prédire la réponse du système sous différents scénarios ou règles de gestion.

I.3. Gestion des ressources en eau : origines et définitions

Le terme « gestion » trouve son origine dans le verbe « gérer » qui vient du latin *gerere*, « porter, administrer, faire, exécuter ». Dans les dictionnaires français, la gestion est l'action d'administrer une collectivité, une entreprise, etc., pour le compte d'un tiers ou pour son propre compte. La gestion est donc liée à l'objet, au système, qu'elle permet d'administrer : une industrie, une rivière, des biens financiers ou immobiliers. Son objectif est d'optimiser le fonctionnement de ces systèmes et notamment l'utilisation des ressources, la fabrication de biens ou de produits par ce dernier.

Toutefois, la définition de la gestion de l'eau a évolué au fil du temps avant de pouvoir gérer un système. Une analyse approfondie est nécessaire afin d'identifier les différents éléments le composant. Il se compose généralement d'entrées et de sorties (figure I.1). Les entrées se partagent en entrées contrôlables u dont nous maîtrisons l'évolution dans le temps et en entrées perturbatrices b que nous ne contrôlons pas et dont, parfois, nous ne connaissons pas l'évolution dans le temps. En ce qui concerne les sorties, elles se partagent entre les valeurs mesurées z ou bien les grandeurs d'intérêts du système y qui peuvent être mesurées ou uniquement simulées et donc différer de z (Walter et Pronzato, 1994).

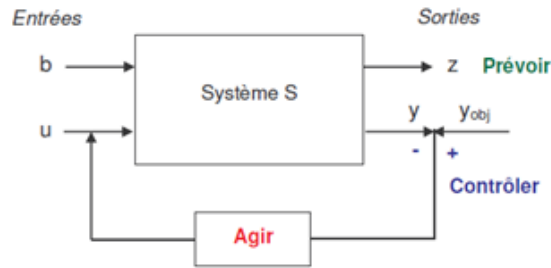


Figure I.1. Les principaux éléments de la gestion du système S

En résumé, la gestion des ressources en eau représente donc l'ensemble des actions permettant de trouver un équilibre optimal entre les approvisionnements en eau et les demandes, dans un hydrosystème donné et à un instant donné, en quantifiant, autant qu'il est possible, les conséquences d'un arbitrage entre les tendances conflictuelles.

Toutefois, la gestion se doit d'être orientée vers les utilisateurs du système et leurs besoins afin de définir des objectifs qui permettront d'aider les gestionnaires à prendre des décisions (Vidal et Belouze, 1997). De plus, la diversité des usages de l'eau peut engendrer des conflits entre les usages non consommant (tourisme, loisirs, pêche, ...) dont les aspects et l'importance sont difficilement quantifiables et les usages consommant (irrigation, industrie et eau domestique). Ces tensions sont encore accrues lorsque des restrictions sont imposées aux demandes.

I.4. Principes de la gestion de l'eau

Selon Hubert (1998), la gestion de l'eau consiste à organiser, grâce à des instruments réglementaires, financiers et technologiques, l'interface entre le milieu hydrique et le milieu social de telle sorte que celle-ci satisfasse des exigences, sachant qu'elles peuvent être très diverses et souvent contradictoires. Toutefois, c'est en fonction des objectifs de gestion que les gestionnaires se fixeraient, des options possibles qui se présenteront à eux et aussi en fonction de la manière dont ces actions seront mises en places. De nombreux principes de gestion pourront être identifiés dans la gestion des ressources en eau : gestion par l'offre ou la demande, gestion intégrée et différentes échelles temporelles et spatiales de la gestion.

Par ailleurs, L'étude des ressources en eau d'une région a pour objectif la quantification des écoulements pouvant exister sur les différents bassins hydrologiques qui constituent cette région. Cette quantification est effectuée dans un but de choix et de recherche d'une gestion optimale compte tenu d'un ou de plusieurs critères donnés.

Dans les pays arides et semi-arides, les gestionnaires et les usagers de l'eau doivent faire face à la conjoncture de la rareté et de l'irrégularité de la ressource, ainsi qu'à la disjonction entre la période des apports en eau et celle où les besoins en eau se déclarent (Pabiot, 1999).

I.4.1 Gestion intégrée, gestion par l'offre et la demande

De nombreux principes relatifs à la gestion des ressources en eau ont été définis. Chacun s'applique dans un domaine bien précis. Les principes de Dublin notamment s'avèrent particulièrement utiles. Ils ont été formulés dans le cadre d'un processus de consultation internationale dont l'apogée a été la conférence internationale sur l'eau et l'environnement, qui s'est tenue à Dublin en 1992 (Nations Unies, 1992). Les quatre principes de Dublin sont :

- ✓ L'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, indispensable à la vie, au développement et à l'environnement ;
- ✓ Le développement et la gestion de l'eau devraient être fondés sur une approche participative impliquant les usagers, planificateurs et décideurs à tous les niveaux ;
- ✓ Pour tous ses différents usages, souvent concurrents, l'eau a une dimension économique. C'est pourquoi elle doit être considérée comme un bien économique.

Ces principes ont, à nouveau, été énoncés et remodelés lors des grandes conférences internationales sur l'eau qui se sont tenues à Harare et Paris, en 1998. Ils ont eu pour objectif de promouvoir une évolution des concepts et pratiques considérés comme essentiels pour l'amélioration de la gestion des ressources en eau. Mais ces principes sont loin d'être immuables. Au contraire, ils doivent être mis à jour régulièrement et gagner en spécificité à la lumière des leçons tirées de leurs interprétations et de leur mise en pratique (Jonch-Clausen *et al.*, 1996). Ces principes soulignent le besoin d'une approche systémique de la gestion prenant en compte toutes les caractéristiques du cycle de l'eau et son interaction avec les autres ressources et écosystèmes naturels ; il s'agit de la gestion intégrée des ressources en eau. Cette dernière est un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social qui en résulte, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux (Jonch-Clausen *et al.*, 1996). Ces principes reconnaissent également que l'eau est nécessaire à de nombreuses fins, et qu'elle est liée à divers services et fonctions. Par conséquent, la gestion intégrée doit prendre en compte les exigences et menaces liées à cette ressource.

I.4.2. Aspects de la notion de ressource en eau

L'objectif de la gestion des ressources en eau est de trouver un équilibre optimal entre les demandes et les usages de l'eau. L'évaluation des ressources en eau est la détermination de leurs sources, de leurs étendues, de leurs vulnérabilités et de leurs qualités, pour évaluer les possibilités de leurs utilisations et de leurs gestions (OMM, 1994).

Le concept de ressource en eau possède une signification utilitaire. Elle représente les eaux de la nature considérées du point de vue de leur utilité pour les humains et des possibilités de les utiliser (CNFSH - Commission de Terminologie, 2007). Les ressources en eau ont bien le sens d'une offre, réelle ou potentielle, rencontrée par une demande en eau.

A partir de cette définition, il faut faire attention toutefois à ne pas privilégier la dimension quantitative des ressources en eau en négligeant les autres dimensions qui servent à la définir et à l'évaluer : qualités de l'eau, accessibilité et maîtrise.

Des liens dynamiques se mettent en place entre les ressources et les usages au travers de l'accès à ces ressources en eau et donc de leurs disponibilités. Les aménagements hydrauliques (barrages, réservoirs) permettent de transformer les écoulements ou les stocks d'eau en ressources. Les nappes souterraines peuvent aussi jouer ce rôle de réserve. Néanmoins, le terme de ressource en eau peut être étendu, non plus seulement à de l'eau stockée, mais à toute particule d'eau potentiellement utilisable pour répondre à un usage.

I.4.3. Variabilité des ressources en eau

Il est évident que des quantités de ressources en eau disponibles dépendront des possibilités de gestion pour satisfaire les usages. Ainsi, la connaissance de la variabilité à court et long terme est très importante afin d'anticiper et prévoir les ressources disponibles à l'horizon de gestion qui nous intéresse. La variabilité des ressources en eau peut donc avoir deux causes essentielles :

- ✓ Les modifications naturelles affectant l'hydrosystème à long terme tels que les phénomènes climatiques ou sur des périodes restreintes comme la variabilité naturelle du climat (quantités de précipitations, évapotranspiration, ...) ou les échanges entre les eaux superficielles et souterraines qui changent en fonction des conditions des niveaux des nappes et des rivières.
- ✓ Les modifications anthropiques de l'hydrosystème telles que la construction d'aménagements (barrages), les changements d'occupation du sol affectant le ruissellement, les usages de l'eau, etc.

I.5. Ressources en eau en Algérie

Nul n'ignore que l'eau est un enjeu majeur pour toute la planète, que les ressources deviennent rares et fragiles et qu'il est désormais vital de promouvoir toutes les initiatives en termes de stratégie et de politique de développement. Ainsi en Algérie, les ressources en eau limitées, vulnérables et inégalement réparties, subissent depuis plus de deux décennies les effets néfastes de la sécheresse et de la pollution. L'accroissement brutal des besoins, les retards enregistrés dans les programmes de mobilisation et de transfert et l'absence d'outils de planification et de gestion, ont généré des situations de déficit chronique, et se sont répercutés de façon négative sur le développement socio-économique de notre pays.

Face à cette situation, et afin de relever les défis que posent les problèmes de l'eau en Algérie, il y a lieu de mettre en place une nouvelle politique de l'eau, fondée sur des principes nouveaux de gestion intégrée de la ressource, ainsi que sur des réformes institutionnelles, juridiques et organisationnelles profondes, en adéquation avec la gravité des problèmes à résoudre. C'est ainsi qu'outre les investissements considérables déjà consentis, toute la priorité vient d'être accordée au secteur des ressources en eau, dans le cadre du plan de relance économique (ROUISSAT, 2012).

I.6. Gestion des barrages réservoirs

I.6.1. Objectifs des réservoirs

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

I.6.1.1. 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 laminier celles-ci. On diminue ainsi l'ampleur et la fréquence des dégâts des eaux sur l'aval du système. (Parent, 1991)

I.6.1.2. 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.6.1.3. 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.6.1.4. Production d'énergie électrique

La production d'énergie électrique 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.6.1.5. Maintien d'un niveau écologique minimum

L'aménagement d'un barrage réservoir modifie clairement le microsysteme de la région, en conséquence, 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.6.1.6. 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.7. Gestion du risque

Il est important de savoir que la gestion d'un barrage se fait dans un avenir incertain, et qu'il y a des risques à prendre en considération. Cependant, il y a des limites, 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.7.1. 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.7.2. Incertitudes physiques

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.7.3. 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.8. Prévision 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 prévision 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 prévision selon les données disponibles.

I.9. Evaluation de la performance d'une gestion

La performance d'un système de gestion de ressource en eau décrit sa capacité à répondre aux différents objectifs considérés. Elle est souvent estimée par la valeur moyenne et la variance obtenue pour diverses variables de sortie du système de gestion. La valeur des indicateurs de performance dépend de deux facteurs (figure I.2) :

- Le facteur de l'adéquation naturelle entre la ressource et les usages de l'eau en termes de volume moyen et de temporalité: La satisfaction des usages est plus difficile à garantir si leur adéquation avec la ressource est mauvaise ;
- Le facteur de la règle de gestion choisie.

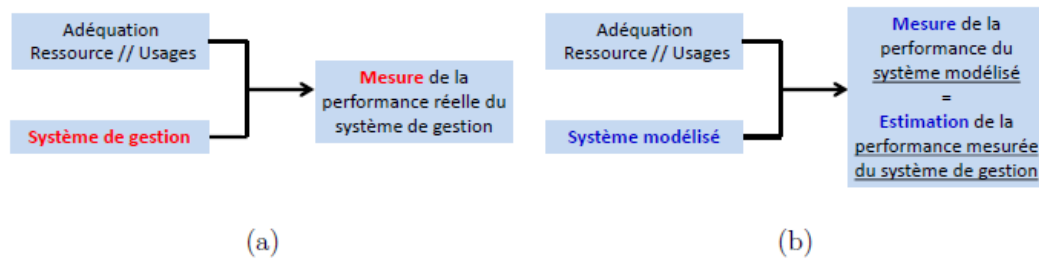


Figure I.2. (a) Schéma de principe de la mesure de la performance d'un système de gestion
 (b) Schéma de principe de l'estimation de la performance d'un système modélisé via un modèle de gestion

Au cours des dernières années, les indices de performance ont été utilisés dans de nombreuses études telles que Moy et al. (1986), Kundzewicz et Laski (1995), Vogel et Bolognese (1995), Kundzewicz et Kindler (1995), Vogel et al. (1999), et McMahan et al. (2006). Pour calculer ces indices, les données requises comprennent les volumes d'eau demandés et les lâchers pour toute la période de gestion, le nombre de périodes de défaillance, ainsi que la durée et la sévérité des défaillances. C'est le pas de temps mensuel qui est le plus souvent utilisé dans toutes les études publiées.

Lorsque de nombreux indicateurs de performance sont disponibles, un décideur peut utiliser certains d'entre eux. Jain et Bhunya (2008) ont étudié le comportement d'un réservoir multi-objectif avec une interprétation probabiliste de la variation des indices de performance. Vogel et Bolognese (1995) ont déterminé un indice de performance des réservoirs connu comme indice de résilience. Oskoui et al. (2015) ont expliqué que le développement de certains indices de performance est très utile pour la planification du réservoir, ce qui donne au gestionnaire un outil puissant pour prédire la capacité de stockage pour les différentes demandes.

Jain (2010) a étudié le comportement de ces indices en utilisant les données d'un réservoir indien. Les indices de fiabilité (temps et volume) et de vulnérabilité ont été trouvés pour donner des informations appropriées sur la performance du réservoir. Un indice de durabilité du réservoir est proposé en utilisant la fiabilité du temps et la vulnérabilité maximale.

Les avancées les plus importantes dans ce domaine ont commencé avec le travail sur la programmation à contraintes de Revelle et al. (1969), qui a été ultérieurement étendu par exemple par Revelle et Kirby (1970), Eastman et Revelle (1973), Revelle et Gundelach (1975), Gundelach et Revelle (1975), Loucks et Dorfman (1975), Houck (1979), Houck et

Datta (1981) et plusieurs autres auteurs, incluant les travaux sur la programmation de fiabilité de Simonovi et 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, trois indices de performance peuvent caractériser 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 lorsqu'il 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.

Mathlouthiet Lebdi (2008), ont désigné les indices 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.

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.

Une fois que les bases de la gestion des barrages réservoirs sont décrites, il est nécessaire d'améliorer en continu la gestion utilisée. L'idéal serait de parvenir à une gestion que nulle autre ne surpasserait. Pour parvenir à cette fin, les techniques sont nombreuses, et sont dites : d' « optimisation ».

I.10. L'importance de l'optimisation dans la gestion de la ressource en eau

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 de l'eau les plus fiables possibles. L'étude des ressources en eau d'une région a

pour objectif la quantification des écoulements pouvant exister sur les différents bassins hydrologiques qui constituent cette région. Cette quantification est effectuée dans un but de choix et de recherche d'une gestion optimale compte tenu d'un ou de plusieurs critères donnés.

L'un des progrès les plus importants réalisés dans le domaine de l'ingénierie des ressources en eau est le développement et l'adaptation des techniques d'optimisation pour la gestion de la complexité des ressources en eau. La revue de littérature révèle de nombreux succès quant à l'apport et l'application de ces méthodes (Ait Kadi, 2001).

Dans les pays arides et semi-arides, les gestionnaires et les usagers de l'eau doivent faire face à la conjoncture de la rareté et de l'irrégularité de la ressource, ainsi qu'à la disjonction entre la période des apports en eau et celle où les besoins en eau sont importants (Pabiot, 1999). Geronimi (2002) souligne que pour gérer un système, les gestionnaires sont amenés à prendre des décisions et à suivre l'influence de ces décisions sur le fonctionnement du système. L'auteur définit la décision comme un acte par lequel un ou des décideurs opèrent un choix entre plusieurs options permettant d'apporter une solution optimale satisfaisante à un problème donné.

Les techniques d'analyse de la gestion et de la planification des ressources en eau ont été largement appliquées au cours des dernières décennies, une attention particulière a été donnée à l'application d'une variété de modèles d'optimisation (Wurbs, 1993). En outre, l'optimisation est un outil mathématique d'aide à la décision qui nous donne la meilleure gestion à réaliser face à des situations particulières. Elle donne simplement la règle de décision optimale par rapport à un critère choisi et par rapport à la probabilité d'occurrence des apports, il s'agira par la suite de confronter les règles trouvées à la réalité, en stimulant le fonctionnement par des données réelles.

Les méthodes d'optimisation comme la programmation dynamique, la programmation linéaire et les métaheuristiques sont largement utilisées dans le domaine de la gestion de l'eau, mais leur champs d'application est loin d'être totalement exploré, car chaque problème d'optimisation a des caractéristiques propres et mérite des études particulières, donc le modèle universel n'existe pas (Fang, 1989).

Todini (2007) confirme que les modèles mathématiques appliqués à la gestion de l'eau permettent d'aider les gestionnaires et les scientifiques, à prévoir les tendances quantitatives et qualitatives, de plus, ces modèles constituent également un moyen relativement sûr, ils permettent de tester la validité des stratégies de gestion. De sa part, Gérard (1981) rapporte qu'un modèle de gestion permet de réaliser la meilleure synthèse des informations

quantitatives et même qualitatives sur l'ensemble d'un bassin, cette synthèse assure la cohérence des données et la critique des valeurs numériques.

Selon Quin (2004), de nombreuses questions ont émergé, notamment sur les objectifs, le choix des règles de gestion et les pas d'espace et de temps à considérer pour permettre la satisfaction des demandes parfois conflictuelles entre les différents usages (irrigation, eau potable, et industrie).

Parent (1991) explique que quelle que soit la technique utilisée et quelle que soit son succès, la modélisation se heurte à de nombreux obstacles. L'auteur rajoute qu'il est souvent très difficile de quantifier l'objectif de la gestion. L'aspect multi-objectifs de la gestion doit être envisagé d'une façon ou d'une autre, notamment pour les systèmes hydro-agricoles où les usages de l'eau sont multiples et souvent complexes pour être décrits par un seul critère de gestion. Schmidt (1980) a noté que si la quantité d'eau est limitée dans un réservoir, il sera important d'établir un calendrier optimal pour le fonctionnement du périmètre irrigué. Ce même auteur souligne qu'il faut tenir compte de la très forte sédimentation du réservoir et de l'évaporation excessive de l'eau stockée.

Dans ce qui suit, les notions d'optimisation, et d'optimisation mathématique, seront explicitées, seuls quelques repères ainsi que les principales applications de ces méthodes dans le domaine de l'exploitation des barrages-réservoirs seront décrites.

I.10.1. Notion d'optimisation

L'optimisation vient du latin « *optimum* » signifiant « *le meilleur* ». Selon la définition de 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 quelque soit la qualité des outils mathématiques employés. 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.10.2. Formulation mathématique

Un modèle d'optimisation est une formalisation mathématique de l'objectif à résoudre un problème de façon optimale. Les modèles d'optimisation apparaissent dans un très grand nombre de situations. 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, les contraintes peuvent être par exemple d'ordre physique (capacités de transfert et de stockage limitées), 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.

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. Pareto (1896) a noté qu'une solution est optimale si aucune autre solution ne l'égale ou ne la

surpasse de tout point de vue simultanément. Le terme « simultanément » fait référence aux problèmes multi objectifs.

Si certaines des grandeurs impliquées, dans un modèle mathématique, sont considérées comme des grandeurs aléatoires, se distribuant selon une loi de probabilité, le modèle est dit « stochastique ». Si aucune de ces grandeurs n'est considérée comme une grandeur aléatoire, le modèle est à l'inverse dit « déterministe » (Hubert, 1998).

La problématique du déterminisme peut s'énoncer comme suit : l'état d'un système au temps t_1 détermine son état au temps t_2 ultérieurement. Il existe une et une seule sortie pour chaque entrée et pour une même entrée, la même sortie sera calculée. Au contraire, les modèles stochastiques simulent des processus qui dépendent, en partie ou totalement, du hasard. Les exemples des modèles stochastiques les plus simples sont les séries temporelles où la variable, en un instant donné, est fonction des valeurs aux instants précédents et d'une erreur aléatoire (Musy, 1998).

Le caractère aléatoire d'une grandeur peut s'appliquer aussi bien à des données qu'à des paramètres et il peut également provenir du caractère aléatoire des phénomènes étudiés (pluies, débits par exemple) ou de l'incertitude s'attachant à leur détermination (paramètres).

I.10.3. Méthodes d'optimisation

Il existe un grand nombre de méthodes d'optimisation qui peuvent être classifiées en deux groupes : les méthodes classiques à savoir la programmation linéaire, la programmation non linéaire, la programmation dynamique déterministe, la programmation dynamique discrète, la programmation dynamique stochastique... ect, et les méthodes modernes parmi lesquelles nous pouvons citer les méthodes les plus connues comme la recherche Tabou, colonie de fourmis, algorithme à essaim de particules, recuit simulé, l'algorithme génétique...etc.

Dans ce qui suit, nous avons donné une description plus détaillée des approches que nous avons utilisé dans ce manuscrit à savoir la programmation dynamique et les algorithmes génétiques utilisés dans l'optimisation du barrage-réservoir de la Cheffia et la programmation non linéaire utilisée dans l'environnement GAMS pour optimiser le plan cultural du périmètre de la Bounamoussa.

Il est important de relever que le terme d'optimisation est souvent remplacé par celui de programmation, mais qu'il ne fait pas allusion à une programmation informatique mais plutôt à une optimisation.

I.10.3.1. Programmation non linéaire (non-linear programming NLP)

Cette méthode a été formulée afin d'avoir une meilleure formulation du problème en évitant les trop grandes simplifications comme dans le cas de la programmation linéaire (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. Ainsi, 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 elle devient difficilement utilisable pour une approche stochastique (où 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 (Bazarrá et al., 1993).

I.10.3.2 Programmation dynamique (dynamic programming)

I.10.3.2.1. Principe

La programmation dynamique a été introduite en 1950 par Richard Bellman, elle s'appuie sur un principe simple, appelé le principe d'optimalité de Bellman : "Une politique optimale est formée de sous-politiques optimales". Le mot politique désigne une séquence de décisions définissant une solution d'un problème d'optimisation. En réalité, le terme programmation signifie plus planification et ordonnancement que la programmation au sens qu'on lui donne de nos jours.

Concrètement, la programmation dynamique est une méthode utilisée pour résoudre des problèmes où une séquence de décisions optimale, (d_1, d_2, \dots, d_n) , doit être trouvée. L'idée de base est que l'on peut déduire une ou la solution optimale d'un problème en combinant des solutions optimales d'une série de sous-problèmes consistant à choisir des séquences plus courtes de décisions. Les solutions des problèmes sont calculées de manière ascendante, c'est-à-dire qu'on débute par les solutions des sous-problèmes les plus petits pour ensuite déduire progressivement les solutions de l'ensemble, la figure ci-dessous représente le principe de la programmation dynamique.

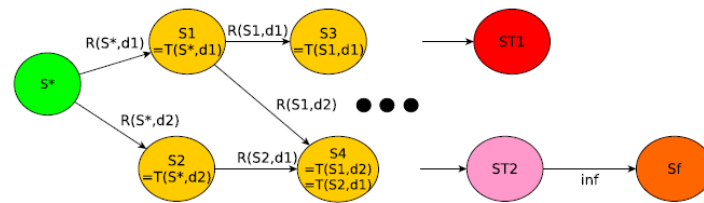


Figure I.3. Représentation graphique de la programmation dynamique

I.10.3.2.2. Eléments de la programmation dynamique

La Programmation Dynamique impose un cadre assez spécifique et donc des contraintes sur les problèmes que l'on peut résoudre grâce à cette méthode. En règle générale, il s'agit d'un problème (P) dont le but est d'optimiser une suite de prises de décisions par rapport au coût qu'elle engendre, cette suite doit être finie et sa longueur N connue par avance. De plus, la suite de prises de décisions correspond à un découpage du problème (P) en sous-problèmes (P_n) (avec n de 1 à N) : à la nième étape, il s'agit de résoudre le problème (P_n) . On espère que, plus n est grand, plus (P_n) est facile à résoudre.

La réalité hydrologique impose toujours une évolution stochastique du système, en outre, la formulation d'un modèle de gestion de la ressource, se définit par:

- ✓ **Les états du système**, correspondant aux niveaux d'eau dans la retenue, au niveau de l'apport, de l'évaporation et des pertes dans la retenue ;
- ✓ **Les commandes**, sont des variables sur lesquelles le gestionnaire peut agir, comme les lâchers ;
- ✓ **La fonction d'évolution** du système qui dépend du temps en plus des deux paramètres précédents (On qualifie le système de **dynamique** car on étudie ses états sur des pas de temps successifs) ;

- ✓ **Les contraintes** du système, elles peuvent être d'ordre physique (capacités de transfert et de stockage limitées) ;
- ✓ **La fonction objectif** permettant d'évaluer les performances d'un système en terme de défaillances ou de gains, elle doit représenter de manière mathématique les attentes du gestionnaire. Son choix reste délicat, car elle est le centre de la gestion.

I.10.3.2.3. Application de la programmation dynamique (DP) pour l'optimisation de la gestion de la ressource

La gestion des barrages-réservoirs a toujours été un excellent sujet d'étude. L'application de la programmation dynamique, est un outil d'aide à la décision de la gestion de la ressource en eau. Cet algorithme d'optimisation permet de tenir compte de la variabilité des apports d'une longue série d'observations à travers leurs probabilités d'occurrence. Si on prend le cas de la gestion de la ressource entre des activités concurrentes, cette méthode permet de définir des lâchers optimaux destinés à l'usage selon le niveau d'eau dans le réservoir et l'instant de décision sur la période de gestion. Ces règles correspondent à l'optimum d'une fonction mathématique traduisant les objectifs de gestion.

Nous pouvons utiliser la DP pour déterminer la politique 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, 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.

Dans la même optique, Cancelliere et al. (2005) ont utilisé 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 modèle de type neuro-flou combinaison entre réseaux de neurones et logique floue.

D'autres auteurs ont utilisé la DP tels : Rao et al. (2001) pour des objectifs d'irrigation et de protection contre les crues à pas de temps mensuel, Russel et 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.

I.10.3.3. Métaheuristiques

Les métaheuristiques sont des algorithmes stochastiques qui permettent d'approximer les solutions de problèmes d'optimisation difficiles. Elles sont souvent utilisées dans le cadre d'applications à des problèmes d'optimisation réels. En effet les problèmes réels sont souvent des problèmes difficiles avec une fonction objectif non linéaire et dont la taille des données est très importante. Pour cette raison il n'est pas possible de les résoudre avec des méthodes

exactes en un temps raisonnable. Lorsqu'on traite des problèmes réels, il faut se résoudre à un compromis entre la qualité des solutions obtenues et le temps de calcul utilisé (figure I.4).

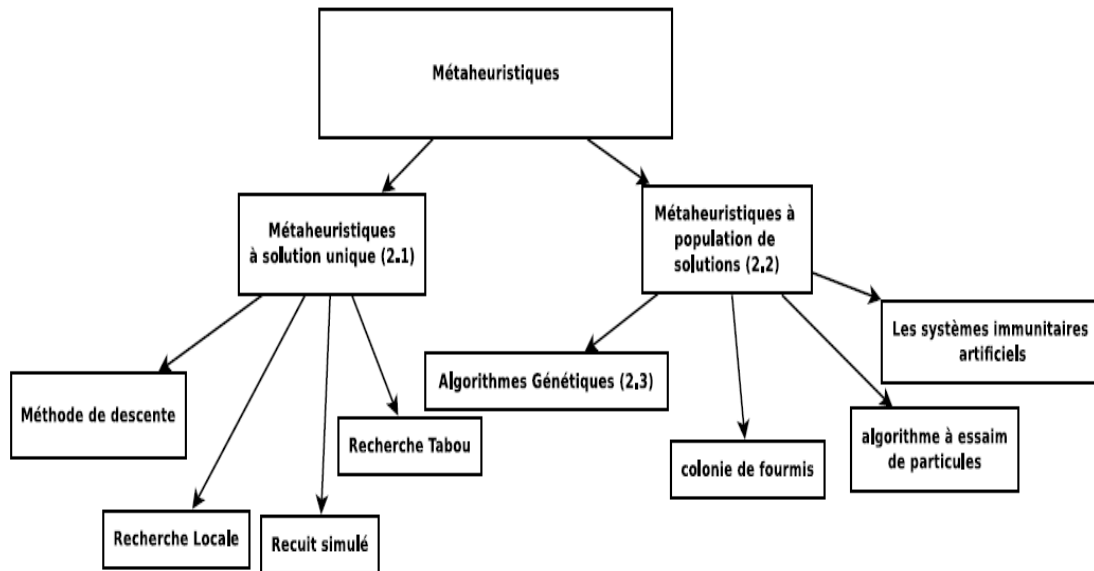


Figure I.4. Classification des métaheuristiques

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 particulaires). Comme nous nous intéressons, dans cette thèse, à la méthode des algorithmes génétiques, nous devons nous approfondir d’avantage dans leurs diverses utilisations.

I.10.3.3.1. Algorithmes génétiques

Cette partie a pour objectif de présenter en détail le principe des algorithmes génétiques. Ces derniers sont inspirés par la théorie de l’évolution introduite par Charles Darwin en 1859. De ce fait, la terminologie utilisée pour définir un algorithme génétique est

en grande partie issue de la biologie. Il convient donc de rappeler au préalable quelques termes de génétique :

- ✓ Toutes les informations nécessaires au développement d'un organisme vivant sont contenues dans ses chromosomes qui sont des chaînes d'ADN (acide désoxyribonucléique) ;
- ✓ Sur chacun de ces chromosomes, une suite de gènes constitue une chaîne qui code les fonctionnalités de l'organisme (la couleur des yeux par exemple) ;
- ✓ L'ensemble des gènes d'un individu constituent son génotype ;
- ✓ La position d'un gène sur le chromosome est son locus ;
- ✓ Les différentes versions d'un même gène sont appelées allèles ;
- ✓ Le phénotype est l'ensemble des caractères observables d'un individu dans son environnement biologique.

Les algorithmes génétiques utilisent l'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 permettent d'obtenir les caractéristiques phénotypiques permettant à l'individu de s'adapter aux besoins de son environnement.

I.10.3.3.2. Théorie et historique des Algorithmes Génétiques

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 des algorithmes génétiques dans la résolution de problèmes est à l'origine les résultats de 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) a expliqué 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.

I.10.3.3.3. Principe général d'un Algorithme Génétique Simple (AGS)

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 dans 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.

I.10.3.3.3.1. 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).

I.10.3.3.2. 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, où quelques 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.

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 (figure I.5). 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.

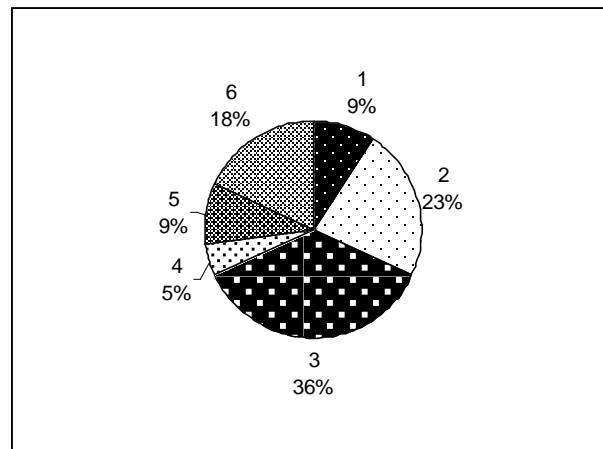


Figure I.5. Modèle de la roulette

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.

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 :

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

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.

I.10.3.3.3. 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 à 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.

I.10.3.3.4. 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 »(figure I.6) ;
- ✓ Le croisement « multi points »(figure I.7) ;
- ✓ Le croisement « uniforme »(figure I.8).

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.

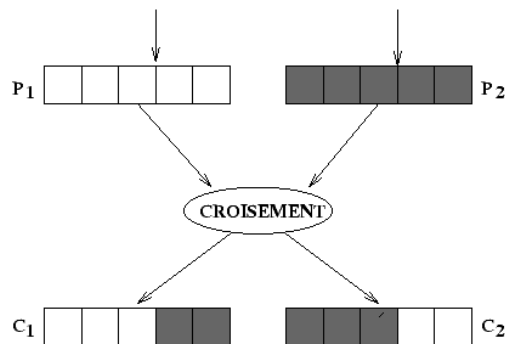


Figure I.6 : Croisement à un point

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

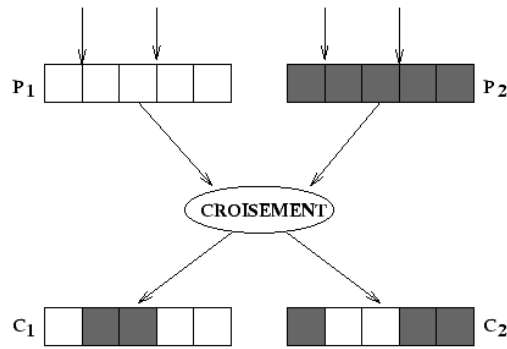


Figure I.7: Croisement multi-points

Le croisement uniforme (Ackley, 1987) 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

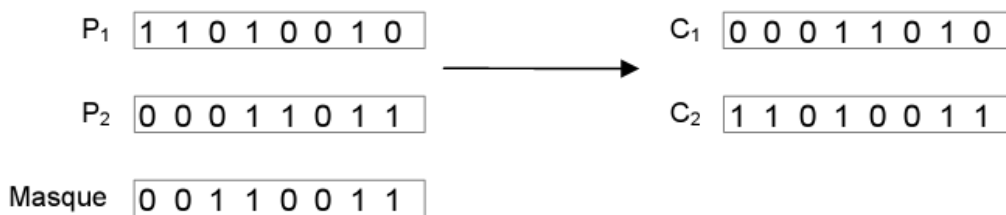


Figure I.8. Croisement uniforme

I.10.3.3.3.5. Opérateurs de mutation

Classiquement, les opérateurs de mutation modifient aléatoirement un individu pour en former un autre qui le remplacera (figure I.9). 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.

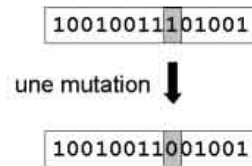


Figure I.9. La mutation

I.10.3.3.3.6. 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 (figure I.10) effectuée lors d'un algorithme génétique :

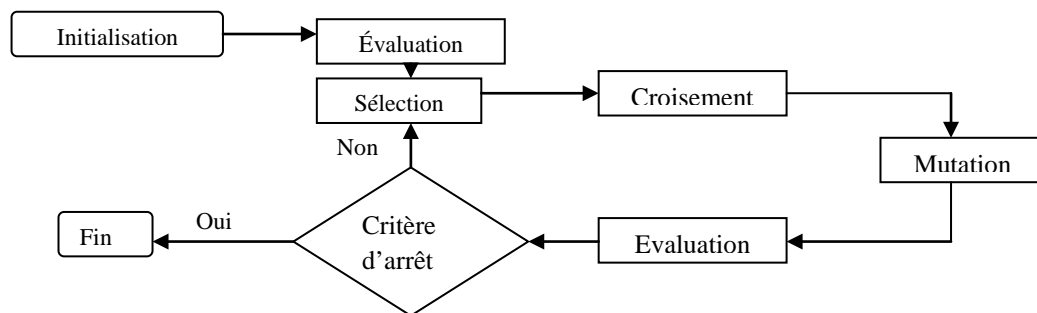


Figure I.10. Boucle générationnelle

I.10.3.3.3.7. 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.

I.10.3.3.3.8.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 (Death 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.

I.10.3.3.3.9. Application des algorithmes génétiques pour l'optimisation de la gestion de la ressource en eau

Les algorithmes évolutionnaires en tant que techniques d'optimisation robustes ont la capacité de trouver des solutions optimales; 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. 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.

Actuellement, nous avons plusieurs algorithmes évolutionnaires produisant les solutions optimales 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 simple, 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, 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.

Park et al.(2004) ont révélé que l'intrusion d'eau de mer, généralement liée au pompage excessif des eaux souterraines, est un problème important pour les régions côtières.

Dans cette optique, ces auteurs ont proposé une approche qui utilise l'optimisation à objectifs multiples, afin de déterminer les bons endroits de pompage et par conséquent, empêcher l'intrusion d'eau de mer, tout en satisfaisant des taux d'extraction désirés à partir des couches aquifères côtières. La recherche de la solution optimale est conduite en utilisant l'algorithme génétique, la fonction objectif est formulée pour maximiser le taux de pompage tout en réduisant au minimum la distance entre le point de pompage et le profil d'intrusion de l'eau de mer. D'après ces mêmes auteurs, les résultats numériques de cette recherche ont été comparés au travail effectué par Cheng et al. (2000), cette comparaison a révélé que le taux de pompage obtenu été plus élevé que celui trouvé dans l'étude de Cheng. Park et al. (2004) et Mantoglou et al. (2008) ont procédé à une conception optimale d'un réseau de pompage et l'évaluation des taux de pompage dans les couches aquifères côtières. Cette optimisation a été basée sur les algorithmes génétiques, leurs objectif était d'optimiser le taux de pompage et les bons endroits de pompage tout en protégeant la couche aquifère contre l'intrusion d'eau de mer. ont conclu que L'utilisation des critères à objectifs multiples, ont démontré avec succès les possibilités du modèle pour atteindre deux objectifs simultanément. L'approche proposée fournit une solution rentable à un problème de gestion important en couches aquifères côtières.

Akter et al. (2004) et Hashemi et al. (2008) ont optimisé la gestion en eau de deux réservoirs (Green de Kentucky aux Etats Unies et Jiroft en Iran) en utilisant un algorithme génétique. Anctil et al. (2006) Ont prévu l'amélioration de la série chronologique régionale quotidienne de précipitations par la méthode d'optimisation. l'algorithme génétique est employé pour orienter le problème combinatoire de pluviomètre vers l'exécution de prévision améliorée.

Chang et al. (2006) ont appliqué ces algorithmes pour l'interpolation et l'estimation des données manquantes des précipitations. Selon Lin et al. (2007), l'algorithme génétique simple (SGA) est une technique d'optimisation populaire et robuste, cet algorithme a été présenté dans cette recherche comme base de la méthode automatisée de calibrage et d'évaluation des valeurs de formes physique. La transformation du problème modèle de calibrage en problème d'optimisation a été proposé. Chang (2008) a proposé un modèle d'optimisation de lutte contre les inondations en temps réel en utilisant les algorithmes génétiques qui ont été employés pour rechercher un optimum global.

Zhang et al. (2009) ont employé les algorithmes génétiques pour réaliser simultanément l'analyse de calibrage et d'incertitude de l'outil SWAT. Cette méthode a été appliquée sur deux bassins : le bassin expérimental de petit fleuve en Géorgie, aux Etats-Unis,

et le bassin où se trouve le fleuve jaune en Chine. Selon ces auteurs, cette méthodologie fournit un outil pratique et flexible pour atteindre la simulation déterministe et l'analyse de l'incertitude fiables. Chang et al. (2009) ont utilisé l'algorithme génétique pour optimiser un système multi-réservoirs ; afin d'évaluer les stratégies communes de gestion optimale et augmenter l'efficacité de l'utilisation de la ressource en eau.

Un algorithme génétique a été proposé par Ramesh et al. (2009) pour 15 stations de mesure de pluie de l'état du Kentucky, Etats-Unis, afin d'obtenir les formes et les coefficients fonctionnels optimaux pour estimer les données absentes de précipitations, cet algorithme fournit une combinaison optimale entre les différents paramètres de mesure. Chang et al. (2010) ont proposé une méthodologie en utilisant un algorithme génétique avec comme contrainte le débit écologique minimum, 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.

Dans l'étude de Kai et al. (2010), un algorithme génétique a été appliqué pour gérer quatre barrages en cascade dans le fleuve de Wujian province de Guizhou de la Chine. Kuo et al. (2010) ont utilisé un modèle de réseau de neurone calibré par un algorithme génétique (d'ANN-GA) pour prévoir l'écoulement fluvial de deux bassins de Taiwan. Ils ont jugé utile que cette méthode est très efficace pour la planification et la gestion saisonnières des ressources en eau pour ces deux bassins. 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.

Parthasarathi et al. (2010) ont développé des modèles qui intègrent la simulation et la prévision des écoulements de l'eau et des sédiments dans le bassin fluvial du Mississippi aux Etats-unis. Ces modèles sont utiles dans la gestion en temps réel des risques de pollution connexes par sédiment dans les cours d'eau. Pour simuler et prévoir, les paramètres des modèles sont estimés en utilisant l'algorithme génétique de tri non-non-dominated II (NSGA-II). La comparaison des exécutions de modèles avec les travaux déjà fait dans ce domaine montre de meilleures exécutions.

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. Hossain et al. (2013) ont expliqué que le fonctionnement d'un système de réservoir est plein de complexités car il traite des incertitudes : la non-linéarité et les variables dépendantes du temps. L'optimisation a été

effectuée par un algorithme génétique avec le maintien de toutes les contraintes de stockage d'un réservoir. Les résultats du modèle ont montré que l'algorithme génétique peut être utilisé comme un outil utile et facilement applicable pour le développement de la gestion optimale des barrages réservoirs.

L'étude de Richard et al, (2014) a proposé une méthodologie, basée sur les algorithmes génétiques, appliquée à un système hydraulique dans lequel tous les flux importants, y compris les flux des interactions aquifère-réservoir sont simulés et optimisés simultanément pour plusieurs périodes. Les résultats ont montré l'efficacité des algorithmes génétiques multi-objectifs pour générer des solutions optimales afin de résoudre les problèmes de la gestion des ressources en eau. Khanjari et al, (2014) ont développé un modèle d'optimisation avec l'intégration du système eau-sol, dans un but de déterminer les lâchers optima d'un barrage réservoir au sud-ouest de l'Iran. Le modèle proposé a été résolu en utilisant un algorithme génétique. L'approche d'optimisation a été appliquée avec succès dans la région, ainsi les décideurs et les gestionnaires de l'eau peuvent l'utiliser comme un outil efficace pour résoudre les problèmes de planification de l'irrigation.

Selon Tsoukalaset al,(2015), il est très compliqué de développer des règles de fonctionnement à long terme pour les systèmes multi-réservoir, en raison du grand nombre de variables de décision (la non-linéarité de la dynamique des systèmes, l'incertitude hydrologique). Cette incertitude a pu être étudiée par le couplage de modèles de simulation avec des algorithmes d'optimisation multi-objectifs appliqués à des séries chronologiques hydrologiques générées stochastiquement.

CHAPITRE II : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Introduction

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 Bounamoussa 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 1500 mm du barrage jusqu'à Zerizer fournissant de l'eau agricole aux prises de Asfour et Zerizer ;
- ✓ Une conduite de diamètre 930 mm de Zerizer jusqu'à Bou-Hadjar. (22.5Km) ;
- ✓ La station de traitement des eaux de Bouhadjar ;
- ✓ Une conduite de diamètre 300 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 diamètre de 1500 (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). En 1951, l'étude géologique a enfin été lancée.

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. Ouvrages

II.3.1. Digue

L'ouvrage est constitué d'une digue en terre compactée avec un masque en amont d'étanchéité en argile (tableau II.1). 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 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

L'évacuateur est de type puits avec seuil déversant et galerie de fuite, il comprend une vanne de type cylindrique d'un diamètre de 16.50 m et une hauteur de 7.90 m. Son débit d'évacuation est de 1800 m³/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 m³/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 aval, 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 (tableau II.2).

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 II.2.Caractéristiques des ouvrages de prise du barrage de la Cheffia

Cotes	Volumes correspondants
Première prise: 138.50 m	1.749 Mm ³
Deuxième prise : 146.00 m	22.369 Mm ³
Troisième prise : 153.50 m	63.416 Mm ³
Vanne clapet : 161.00 m	121.063 Mm ³
Prise d'irrigation : 133.26 m	0.001 Mm 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 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 Kroumiri 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 plaine, formant un vaste marécage au pied de la chaîne numéridique d'Annaba à El Kala (figure II.1).

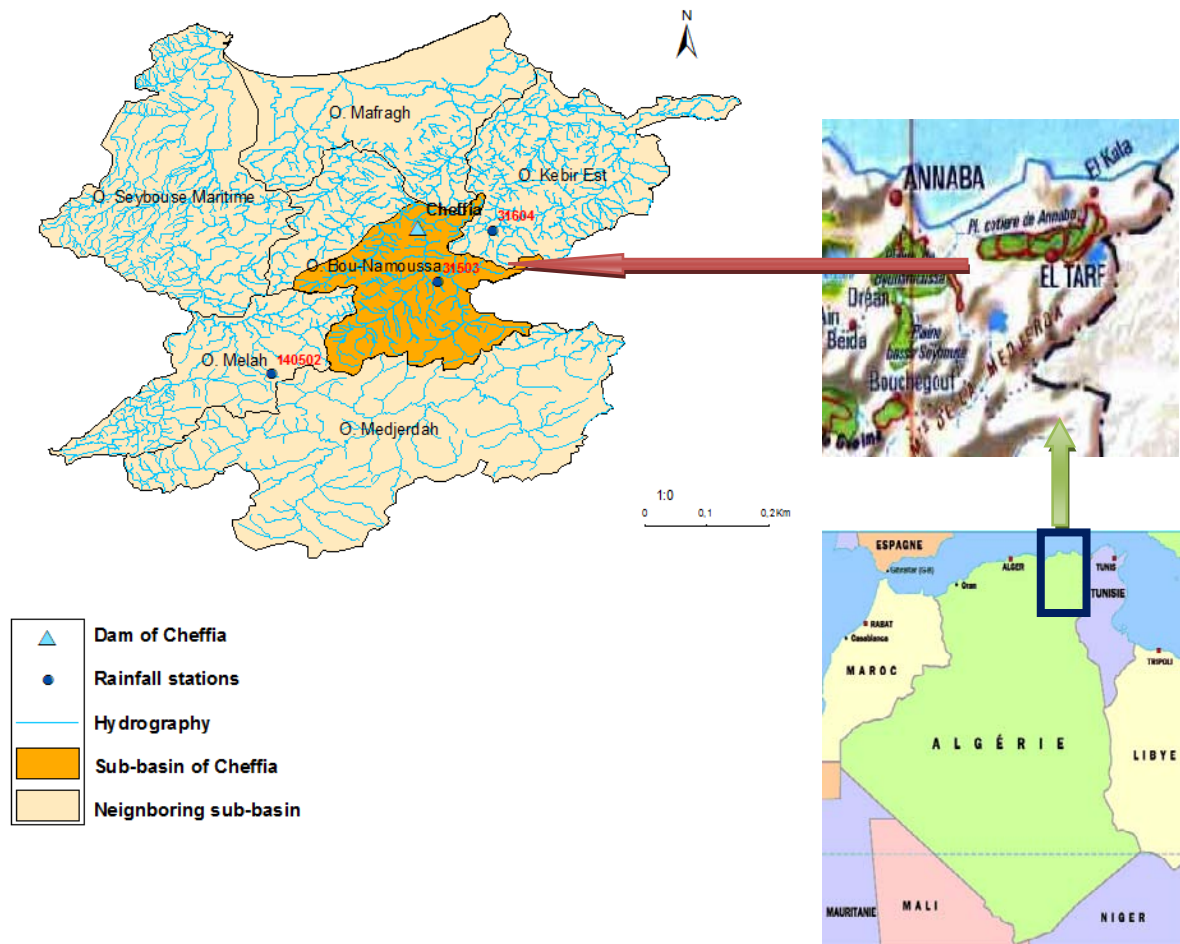


Figure II.1.Présentation de la zone d'étude

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 El Kala. Cette dépression est parsemée de marécages : marais M'Krada, Lac des oiseaux et 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. 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 Bouamoussa 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 250Km².

Au confluent avec le Bouhadjar, le Kebir draine un bassin versant de 420Km² 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 Bounamoussa 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. A cette époque, 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.

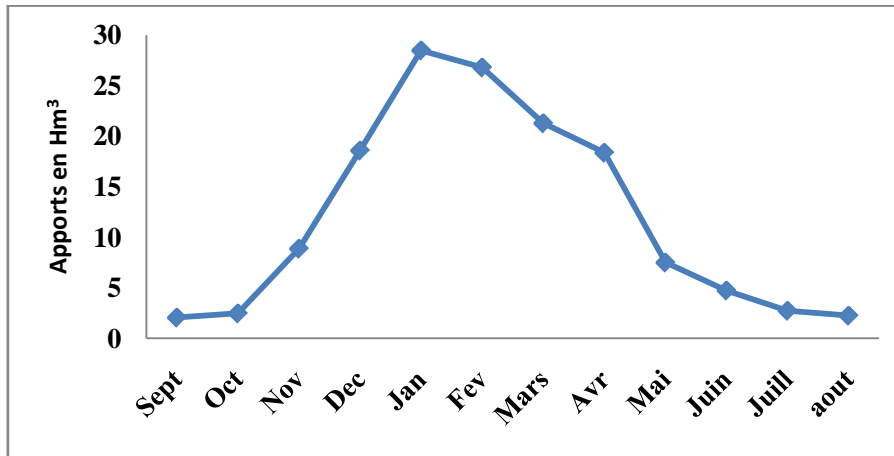


Figure II. 2. Moyennes mensuelles inter annuelles des apports au barrage en mm

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 II.3.Représentation des valeurs des crues

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

La crue de 2.000 m³/s est la valeur adoptée pour le calcul des ouvrages d'évacuation ; pour une crue supérieure à 2.000 m³/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 elle est caractérisée par une saison pluvieuse allant de Septembre à Mai, ainsi qu'une saison sèche de Juin à Août.

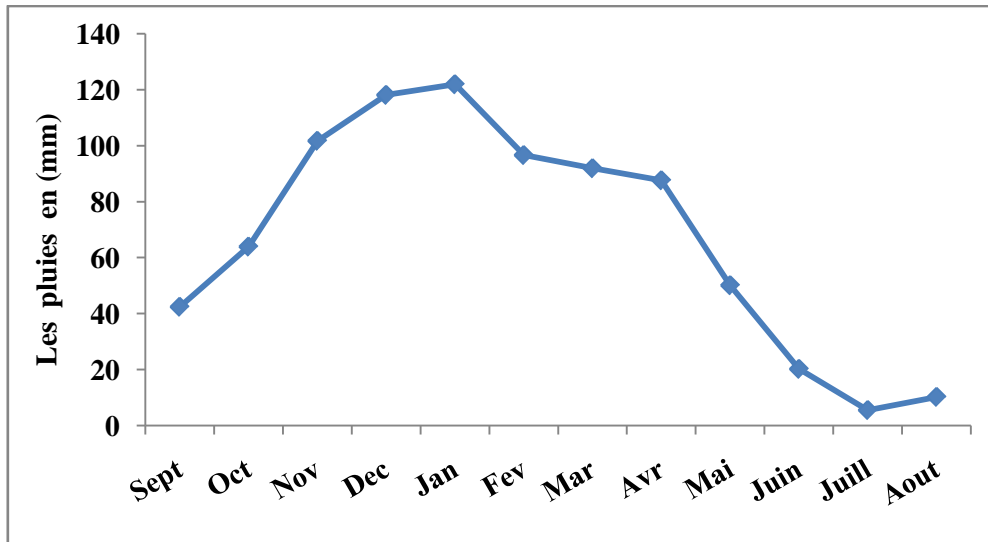


Figure II.3. Moyennes mensuelles inter annuelles des pluies en mm

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 :

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 m³.

II.6.3 Transport Solide

On admet que 1 m³ 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 m³/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

Avant la construction du barrage, la ville d'Annaba était alimentée 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 elle était salée. Les conduites de Blandan et de Salines étaient 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 ensuite 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, ensuite, 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 à cause des 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.

Néanmoins, une priorité a été donnée pour l'industrie d'El Hadjar en raison des multiples procédés 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 Bounamoussa, 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.

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 d'une part, et d'autre part, 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.

Cette partie sera développée en détail dans le dernier chapitre qui traite l'optimisation du plan cultural de ce périmètre.

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

L'étude et la critique des données existantes nous ont permis de combler les vides, de détecter les valeurs douteuses, et de 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 que nous avons pris en compte sont les pluies et les ETP.

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 2010. Le tableau suivant contient les caractéristiques des stations pluviométriques considérées, avec leurs noms, ainsi que leurs coordonnées.

Tableau II.6. 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 sont disponibles depuis Septembre 1980 jusqu'en Août 2008, mais comme ces valeurs sont cycliques à cause de la durée qui est plus courte, ceci n'influence pas beaucoup les modèles. Concernant le barrage, les données sont recueillies à un pas de temps mensuel, depuis 1970 jusqu'en 2010 (40ans). Cela constitue une base de données très intéressante du fait de sa longueur et de sa mise à jour (tableau II.7).

Tableau II.7.Données du barrage de la Cheffia

Nom	Description
App.(Mm ³)	volume d'eau mensuel entré dans le barrage
AEP. (Mm ³)	Volume alloué à l'Alimentation en Eau Potable
Irrig. (Mm ³)	Volume alloué à l'Irrigation
AEI (Mm ³)	Volume alloué à l'Industrie
Cons. Tot. (Mm ³)	Consommation Totale : AEP, Irrigation et industrie
Vidange (Mm ³)	Volume vidangé par mois
Evap. (Mm ³)	Volume d'eau évaporé par mois
Cote Deb. (m)	Cote d'eau dans le barrage en début de mois
Vol. Deb. (Mm 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. (Mm 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 ce type d'échantillon est de combler les lacunes, détecter et corriger les valeurs douteuses et enfin critiquer les 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.

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) :

$$K_n = 3.62201 + 6.28446 * n^{1/4} - 2.49835 * n^{1/2} + 0.491436 * n^{3/4} - 0.037911 * n$$

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 II.8. Résultats du Test de Grubbs et Beck

Paramètre	Xl	Xh
Débits (l/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 cette étape de notre étude il a été 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 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. Elle 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 :

$$K=L-\frac{q(q+1)}{2} \text{ et } F=pq-K \quad L=\sum_{i=1}^q R(x_i)$$

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 nombres 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 $s_K=s_F=\left(\frac{pq}{12}(p+q+1)\right)^{1/2}$

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 $\alpha/2$. 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 ($T \geq U_{\alpha/2}$).

Les résultats de ce test montrent que les observations de tous les paramètres étudiés sont non homogènes (tableau II.9).

Tableau II.9. 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

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, 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 II.10. 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

II.11.3.2. Conclusion

Dans ce travail, différents tests ont été étudiés pour vérifier d'une part hypothèse d'homogénéité et d'autre part, l'hypothèse d'indépendance des observations d'une série chronologique. Des conclusions spécifiques ont été présentées quant au choix des tests les plus performants sur des bases purement théoriques.

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 avons présenté et critiqué 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.

Et pour clore ce chapitre, nous avons tenté de gérer le barrage, en se substituant au gestionnaire. Cette gestion est considérée comme rationnelle, et proche du parfait, car connaissant les apports futurs, nous pouvons revenir sur nos décisions, et éviter ainsi toute défaillance. Aussi nous avons comparé cette simulation à l’historique sur la base du calcul de Probabilités, et du taux de satisfaction. Cette dernière étape nous a permis de confirmer si la ressource en eau est 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 nous renseignent 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 :

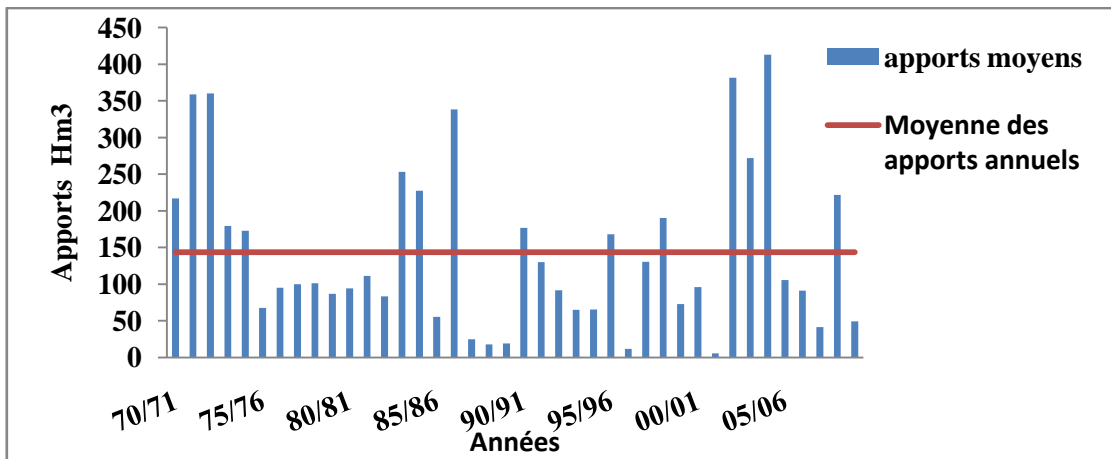


Figure III.1.Représentation des apports annuels historiques

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. Il est à noter 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 :

$$Nc=1+\frac{1}{2} \times \ln(N)$$

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 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 elle 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 :

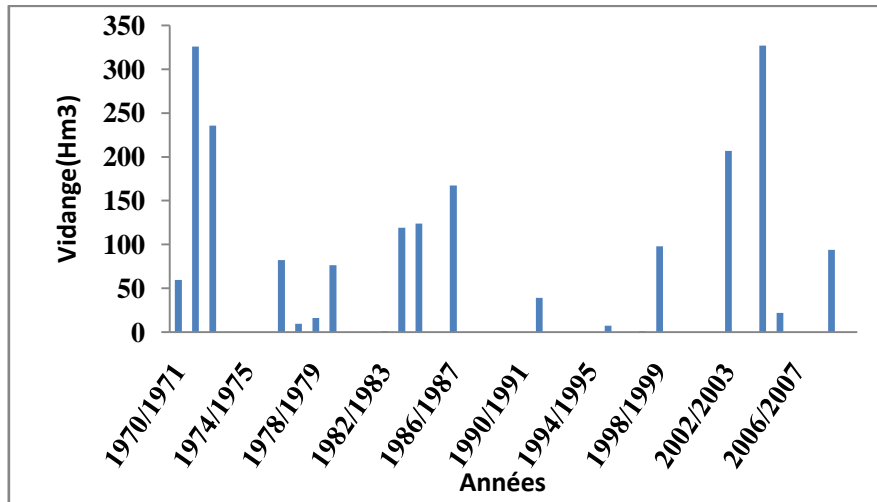


Figure III.2. Analyse des vidanges annuelles historiques

L’analyse de ce graphe, montre 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 allocations 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 l’allocation 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, a été réalisée.

III.4.1. Allocation pour l’AEP

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

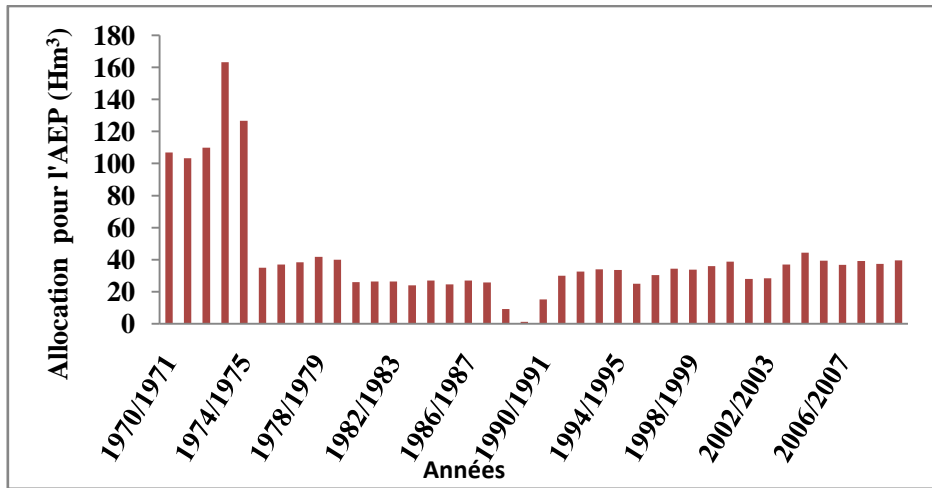


Figure III.3. Représentation des allocations annuelles historiques pour l’AEP

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 Mm³, alors que l’allocation ne devrait pas excéder les 40 Mm³. Un pic de 160 Mm³ a d’ailleurs été atteint en 1973/1974.

A partir de Septembre 1978, nous remarquons que la variation des allocations fluctue généralement entre 20 et 40 Mm³, exception faite pour les années entre 1989 et 1991 où elle était extrêmement faible avec une valeur exceptionnelle pour l’année 89/90 atteignant à peine 1.24 Mm³. 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 Mm³.

III.4.2. Allocation pour l’irrigation

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

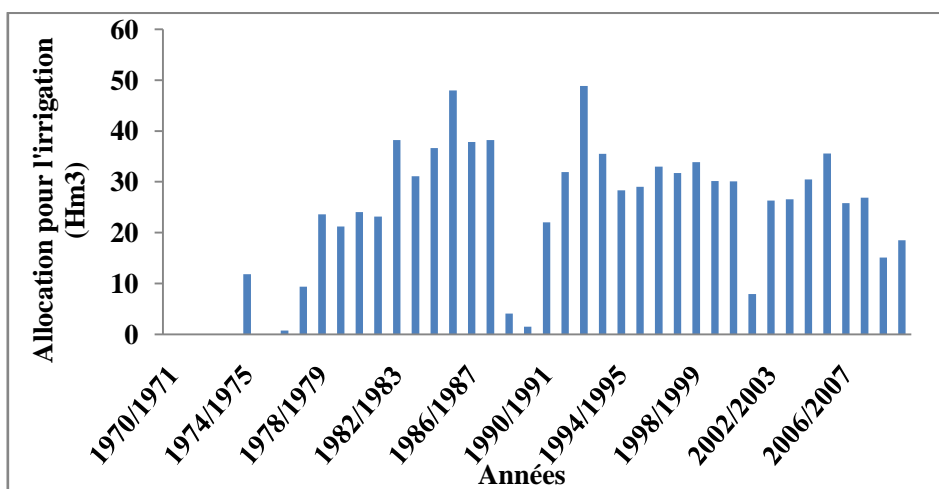


Figure III.4. Représentation des allocations annuelles historiques pour l’irrigation

D’après ce graphe, nous remarquons que les années entre 1970 et 1977 n’ont connu aucune allocation pour l’irrigation, hormis l’année 1974/1975, où l’allocation était à peine égale à 10 Mm³. Ceci est extrêmement étonnant étant donné que l’allocation 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, l’allocation 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. Allocation pour l’industrie

Les allocations annuelles pour le secteur de l’industrie sont représentées dans la figure suivante :

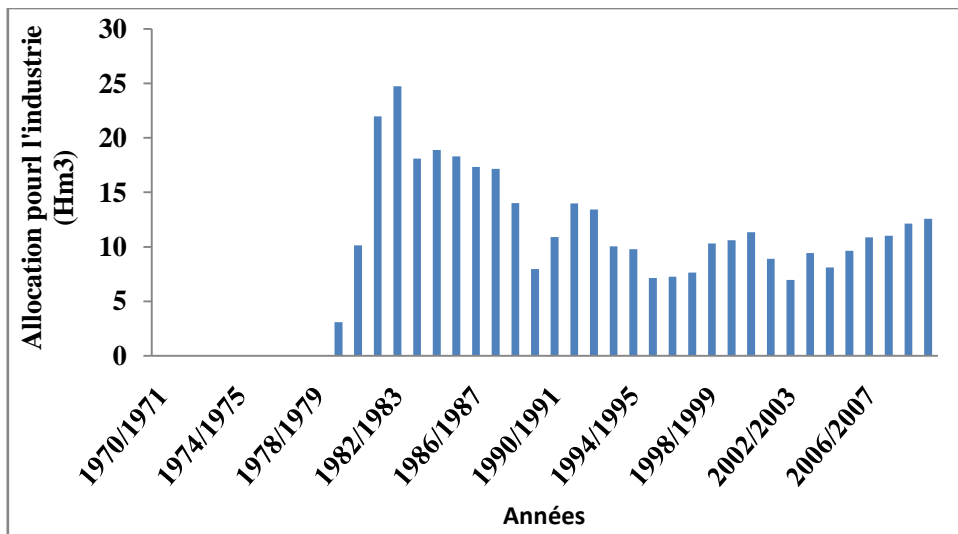


Figure III.5.Représentation des allocations annuelles historiques pour l’AEI

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 atteignant les 25 Mm³. Ainsi, l’allocation 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, ne fut pas l’AEP mais plutôt 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 :

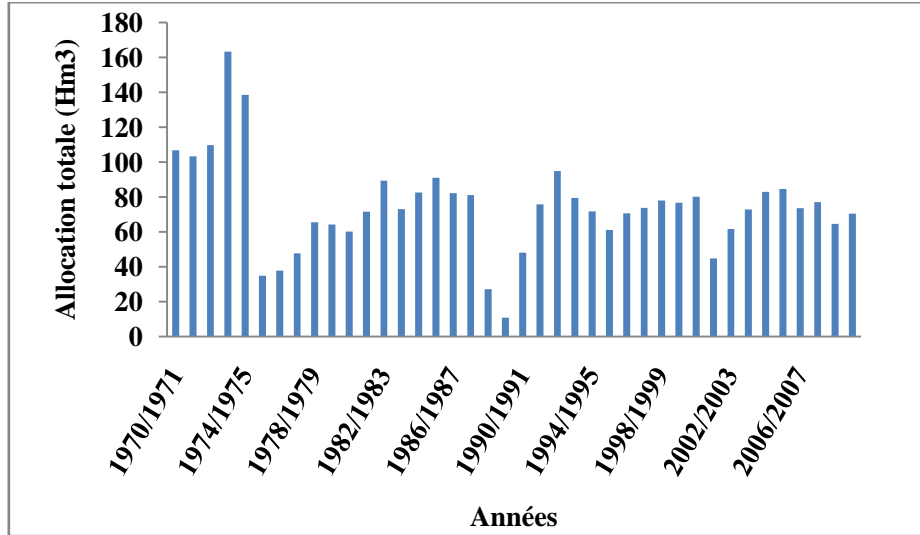


Figure III.6. Représentation des allocations annuelles historique des trois secteurs

L'analyse de l'allocation totale, pour les trois secteurs, montre un maximum pour l'année 1973/1974 atteignant 160 Mm³, suivi, deux années après d'une baisse importante atteignant un volume à peu près égal à 40 Mm³. Un minimum de 11 Mm³ est enregistré entre 1989/1990. Aussi, l'année 2001/2002 enregistre aussi un faible volume d'eau consommé n'atteignant pas les 50 Mm³.

III.5. Analyse des allocations mensuelles

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

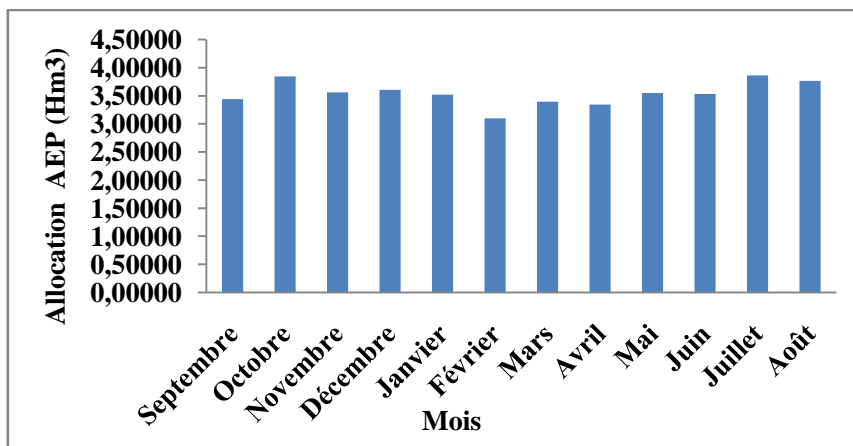


Figure III.7. Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l'AEP

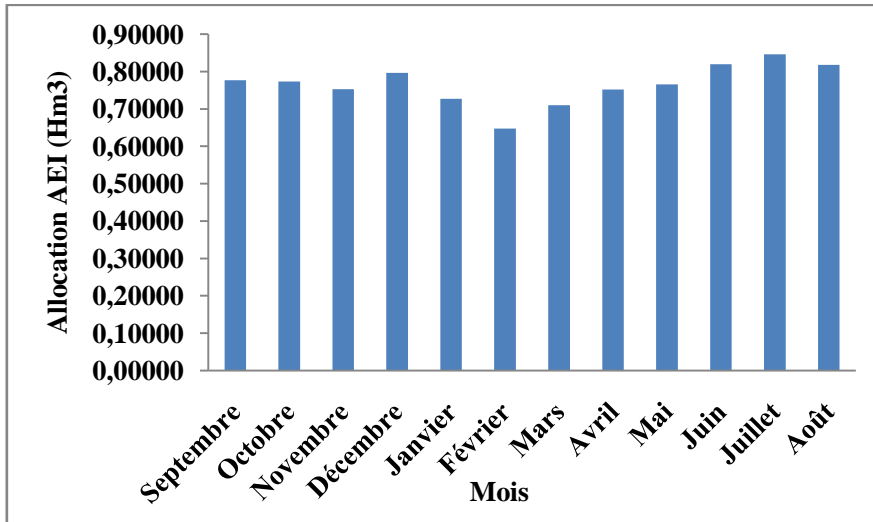


Figure III.8. Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l’AEI

Les allocations 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, nous avons noté, une grande différence de l’allocation 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 :

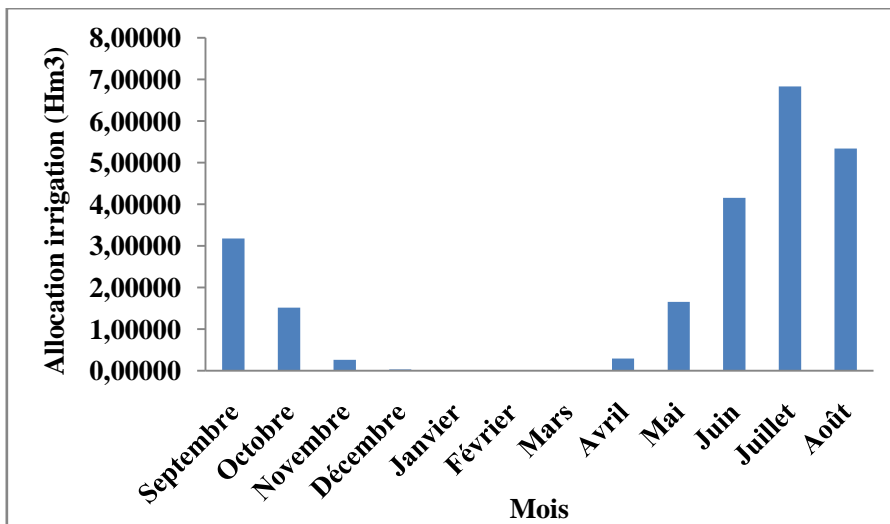


Figure III.9. Représentation des volumes mensuels moyens interannuels alloués à l’Irrigation

III.6. Analyse des données par la méthode de l’Analyse en Composantes Principales (ACP)

L’analyse en composantes principale (ACP) 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.8). 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 par le bilan d'eau. Le résultat graphique de la corrélation entre les deux premières composantes principales réduites est représenté dans le cercle ci-après :

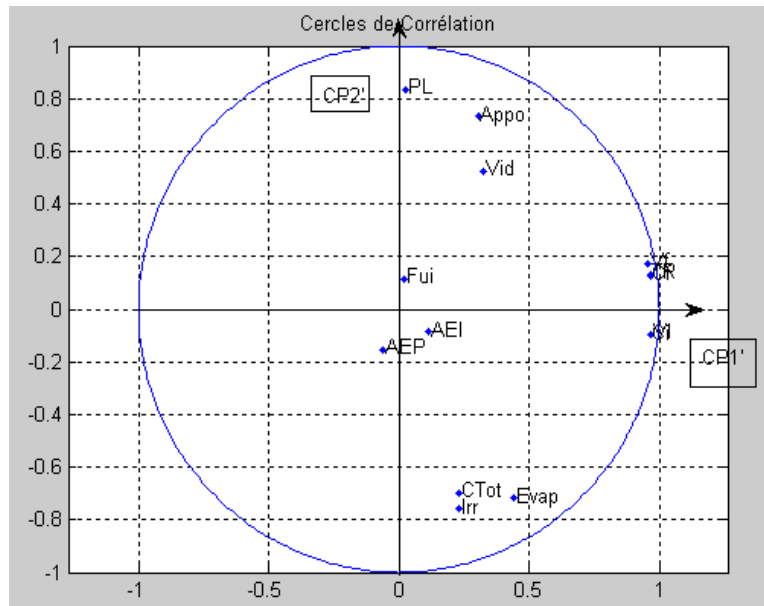


Figure III.10. Cercle de corrélation CP1' et CP2' des 14 paramètres de la gestion passée

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 inexplicé 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 avec aucun autre paramètre

III.7. Critique de la gestion réelle ou historique

Dans ce travail, la critique de chaque gestion a été faite en termes de probabilité d'apparition des allocations dans les intervalles représentés dans les tableaux III.2 et III.3, dont les bornes ont été choisies de manière aléatoire. Chaque intervalle représente une qualité de satisfaction : Bonne, moyenne et faible.

Tableau III.2 : 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 III.3 : 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 résultats présentés par les deux tableaux suivants :

Tableau III.4. Probabilités des allocations annuelles totales, pour la gestion historique

Probabilités des Lâchers Totaux			Historique
Bonne	P1	>82	30
Moyenne	P2	[57 82]	52
Faible	P3	< 57	18

Le tableau ci-dessus montre que les allocations totales sont globalement ‘moyennes’, avec une probabilité de 52%. Ainsi, 30% des allocations sont considérées comme étant bonnes, mais 18% restent mauvaises.

Tableau III.5. Probabilités des allocations annuelles de chaque secteur, pour la gestion historique

Probabilités des Lâchers Totaux			Historique
Bonne	P11	>32	60
Moyenne	P12	[24,32]	30
Faible	P13	[0,24]	10
Bonne	P21	>10	50
Moyenne	P22	[8,10]	12
Faible	P23	<8	15
Bonne	P31	>40	5
Moyenne	P32	[25,40]	50
Faible	P33	<25	32

Lorsque nous considérons les allocations 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.

Par conséquent, et de manière générale, nous remarquons que la priorité est donnée au secteur de l’AEP, ensuite à l’industrie, et enfin, l’irrigation. La figure ci-dessous montre les taux de satisfaction annuels des trois secteurs confondus.

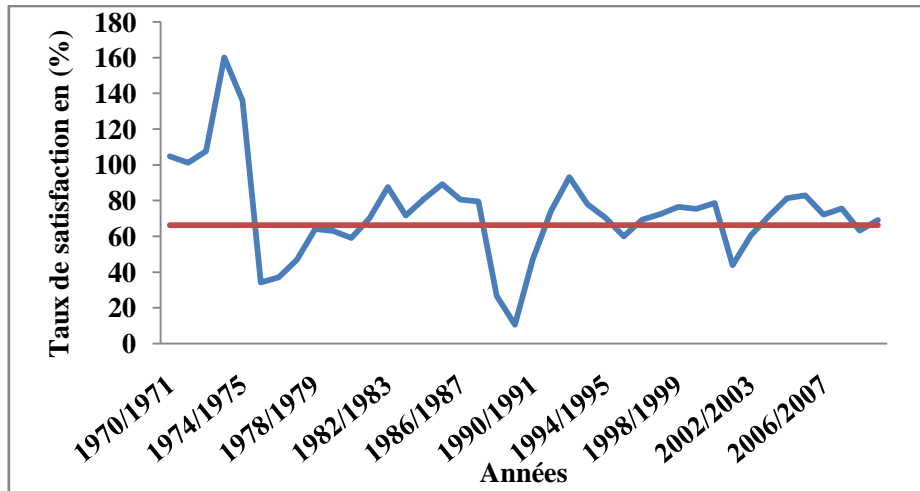


Figure III.11. Variation du taux de satisfaction annuel total de la gestion historique

Nous remarquons une importante fluctuation du taux de satisfaction annuellement. En occultant les années précédant 1975, le taux de satisfaction n'égalé 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 par le bilan d'eau

Après avoir analysé la gestion historique du barrage de la Cheffia en premier lieu, nous nous sommes substitués au gestionnaire en second lieu et enfin nous avons pris nos propres décisions concernant les lâchers. La différence entre les deux gestions est notable : en effet, nos décisions sont 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 a rendu 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 sommes fixés comme objectif de se rapprocher le plus possible des lâchers optima, donc, de la demande réelle des trois secteurs. Cette démarche constitue une nouvelle variante de gestion qui permet 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,
 Vi : 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 .
 Vf : 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 sont 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** : $40Mm^3$, ce qui conduit à une demande mensuelle à peu près égale à $3.33Mm^3$.
- ✓ **Alimentation en Eau pour l'Industrie** : $12Mm^3$, ce qui conduit à une demande mensuelle d' $1Mm^3$.
- ✓ **Irrigation** : $50Mm^3$, 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 allocation nulle.

Nous avons donc constitué le vecteur de la demande suivante :

Tableau III.6. 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 est au mieux juste, et au pire au dessus de la demande minimale (tableau III.7).

Tableau III.7. 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
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 :

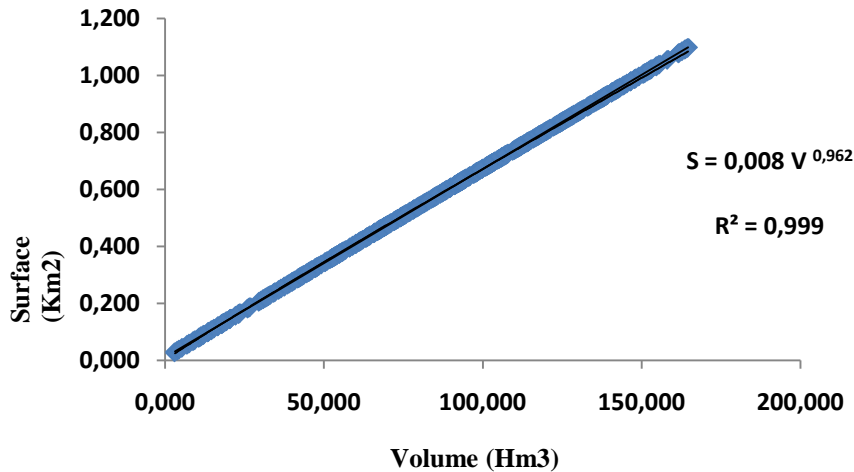


Figure III.12.Surfaces en fonction des volumes

L'équation "Surface=f(Volume)" est la suivante : **Surface = 0.008 × V^{0.962}**

Ainsi, l'évaporation répondra à l'équation : *Evap (i)=Lame d'eau évaporée×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 :

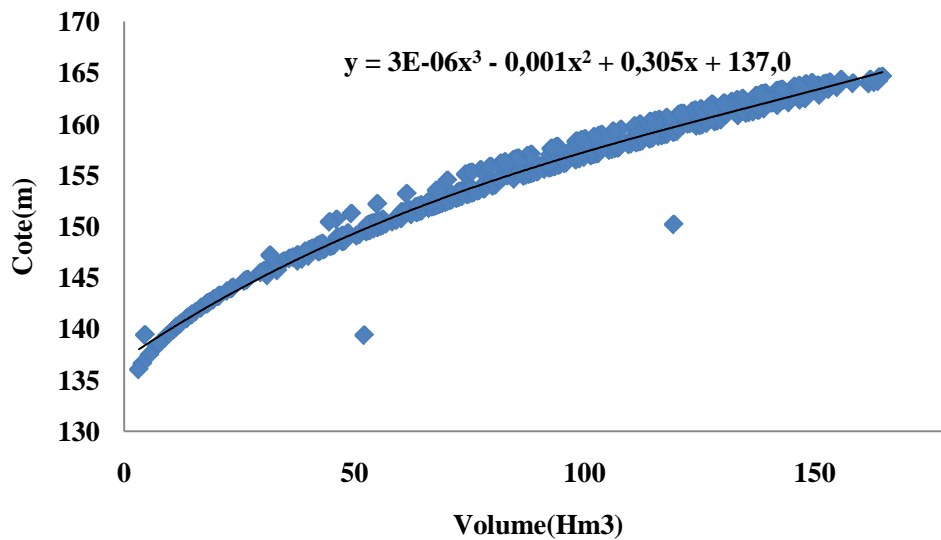


Figure III.13. Les cotes en fonction des volumes

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

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

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'a 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 par le bilan d'eau

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

- ✓ La première des choses que nous avons remarqué c'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 termes de temps de calcul.

- ✓ Aucun moyen n'a été trouvé afin que l'allocation soit égale à la demande exacte. En effet, les périodes de sécheresse connaissent forcément une diminution de l'allocation.
- ✓ La gestion réelle du barrage (historique) durant les quarante années n'est pas si catastrophique. En effet, si nous avions alloué la demande exacte, nous aurions rencontré plusieurs fois une défaillance, or, le gestionnaire 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 : bilan d'eau et historique

Comme pour la gestion réelle, la gestion par le bilan d'eau est jugée en fonction des probabilités obtenues dans les tableaux ci-dessous. Les probabilités annuelles de la gestion par le bilan d'eau sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.8. Comparaison des Probabilités annuelles globales des gestions : historique et bilan d'eau

Probabilités des lâchers Totaux			Historique	Bilan d'eau
Bonne	P1	> 82	31	82.5
Moyenne	P2	[57 82]	52	7.5
Faible	P3	< 57	18	10

En comparant la gestion par le bilan d'eau à celle de l'historique en termes de probabilités de satisfaction des trois secteurs confondus, nous remarquons un accroissement de 52% des allocations totales situées dans la tranche des bonnes satisfactions.

En effet, nous sommes passées de 31% en gestion historique à 83% en gestion par le bilan d'eau. Ce qui est en soi un excellent résultat. Les Probabilités annuelles par secteur sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau III.9. Comparaison des Probabilités annuelles pour chaque secteur des gestions : historique et bilan d'eau

	Probabilités par secteur			Historique	bilan d'eau
	Bonne	P	Intervalle		
AEP	Bonne	P11	>32	60	83
	Moyenne	P12	[24,32]	30	7.5
	Faible	P13	[0,24]	10	10
AEI	Bonne	P21	>10	50	87.5
	Moyenne	P22	[8,10]	12.5	5
	Faible	P23	<8	15	7.5
Irrigation	Bonne	P31	>40	5	72.5
	Moyenne	P32	[25,40]	50	20
	Faible	P33	<25	32.5	5

Les résultats de la gestion par le bilan d'eau sont très intéressants ; En effet, pour l'AEP, nous sommes passés de la probabilité de 60% pour les bonnes satisfactions en gestion historique à 83% en gestion par le bilan d'eau.

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 historique et par bilan d'eau.

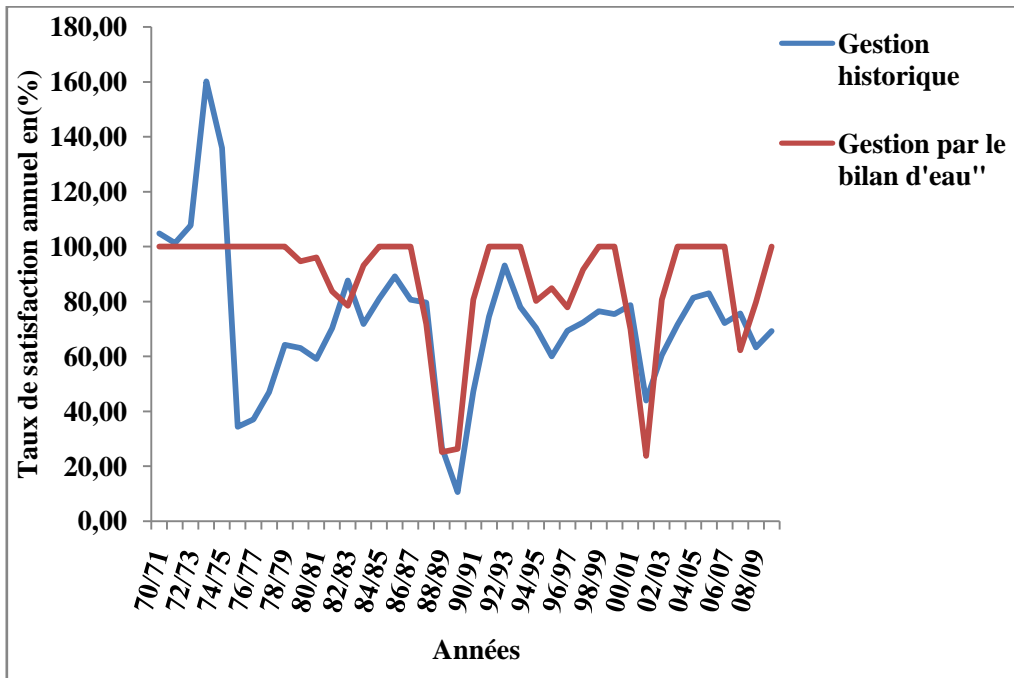


Figure III.14. Comparaison des taux de satisfactions annuels des gestions historique et par le bilan d'eau

Nous remarquons une nette amélioration des taux de satisfaction de la gestion par le bilan d'eau. 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 historique. Cette valeur reste tout de même faible. La figure suivante est issue de l'ACP sur la gestion par le bilan d'eau et représente la corrélation de la première CP' à la seconde :

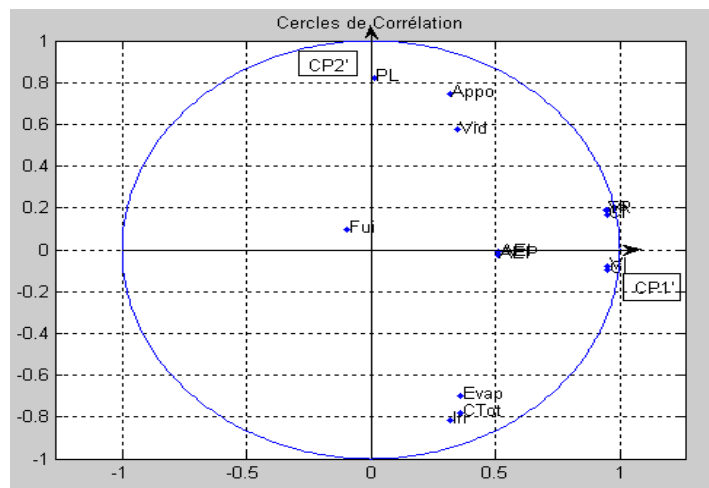


Figure III.15. Cercle de corrélation CP1'-CP2' de la gestion d'un par le bilan d'eau

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.

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 par le bilan d'eau, 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 DU BARRAGE DE LA CHEFFIA

IV.1. Introduction

L'optimisation est un outil fondamental pour la gestion des ressources en eau, c'est une procédure mathématique qui permet de déterminer les valeurs d'un ensemble de variables de décision qui maximise ou minimise une fonction d'objectif. Dans la pratique, l'optimisation rencontre des difficultés quant au choix de la fonction objectif et aussi de la formulation mathématique, ces derniers doivent être capables d'exprimer correctement les conséquences des décisions prises en tenant compte de toutes les contraintes liées au problème étudié.

De nombreux scientifiques ont développé des politiques de gestion optimales de réservoirs au cours des quatre dernières décennies en utilisant plusieurs méthodes, entre autres : la programmation dynamique (DP), la programmation linéaire (LP), la programmation non linéaire, (NLP), les algorithmes génétiques (GA), etc.

De nombreux problèmes de la gestion des ressources en eau peuvent être résolus de manière efficace par optimisation de la gestion en utilisant la programmation dynamique et les algorithmes génétiques. Cependant, ces méthodes d'optimisation doivent toujours être considérées comme des outils d'aide à la décision et non pas comme méthodes fournissant des réponses définitives. Parmi les problèmes qui peuvent être effectivement rencontrés par l'optimisation, il y a le problème de la détermination optimale des lâchers provenant d'un barrage-réservoir.

L'objectif de ce chapitre est d'en tirer la meilleure politique de gestion optimale pour un seul réservoir à usages multiples en utilisant l'approche de la programmation dynamique déterministe, Nous nous sommes intéressés aussi à l'optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par la méthode des algorithmes génétiques.

IV.2. Optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par la méthode de la programmation dynamique déterministe discrète (PDD)

IV.2.1. Présentation de la méthode utilisée

Le modèle de PDD qui a été développé par LABADIE (1990), il a été utilisé pour la première fois dans le cas d'optimisation du réservoir de Pozillo en Italy. La fonction « objectif » de ce modèle s'exprime comme suit :

$$S = \sum_{t=1}^N (D_t - R_t)^2 \quad (1)$$

Où :

D_t : La demande à l'instant (t) ;

R_t : Les lâchers (Releases) à l'instant (t).

L'expression mathématique de la fonction objectif utilisée est celle qui consiste à maximiser les lâchers à l'aval ; en d'autres termes, minimiser l'écart entre les lâchers et la demande actuelle ; et cet écart est calculé pour chaque mois.

L'équation de continuité ou du bilan hydrique du réservoir du début du mois est à inclure dans le modèle est la suivante :

$$S_t = S_{t-1} - R_t - I_t - E_t - Sp_t \quad (2)$$

Où R_t : Lâchers du réservoir s au mois t ;

I_t : Apport au réservoir au mois t ;

E_t : Les pertes par évaporation et infiltration.

Sp_t : Les déversements.

Les contraintes supplémentaires sur le lâcher et le stock maximum et minimum admissibles peuvent être formulées comme suit :

$$C_{min} \leq S_t \leq C_{max}, \quad t = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$0 \leq R_t \leq D_t$$

Dans le cas d'un modèle déterministe de la gestion d'un barrage, toutes les variables d'entrée pour chaque pas de temps sont connues, alors, les différents niveaux d'eau ne dépendent que des décisions de lâchers. On définit ainsi pour ce modèle dynamique deux ensembles : les variables de décisions et les variables d'états.

La mise en œuvre de la programmation dynamique du problème d'optimisation du barrage de la Cheffia considère les lâchers (u_t) comme variables de décision et le stock disponible dans le réservoir (S_t) comme variable d'état, l'équation d'état est réécrite sous forme inversée de l'équation (2) comme suit:

$$U_t = S_{t-1} - R_t - I_t - E_t \quad (4)$$

Les lâchers(U_t) dans l'équation (3) incluent également occasionnellement les déversements.

La fonction objectif de l'équation (1) peut être décomposée comme une somme de fonctions comme suit :

$$Z_t = (D_t - U_t)^2 \quad (5)$$

$$S = \sum_{t=1}^N Z_t \quad (6)$$

Ceci permet de résoudre le problème d'optimisation à l'aide de la résolution de l'équation récurrente de Bellman (Backward) :

$$\int_t^n (S_t) = \min (Z_t + \int_{t+1}^{n-1} (S_{t+1})) \quad (7)$$

où n est le nombre de classes (La nature de la programmation dynamique impose la discrétisation du volume du stock en zones).

La Mise en œuvre pratique de l'algorithme ci-dessus nécessite une certaine manipulation de l'évaporation E_t et des déversements. L'évaporation est calculée en multipliant la lame d'eau évaporée de la surface de l'eau stockée dans le réservoir. La surface de l'eau est en fonction du volume de stockage au moyen d'une relation qui les unie. RESOPTI (Reservoir optimization) permet d'exprimer cette dernière relation au moyen d'une des deux formules suivantes:

$$A = a S^b \quad (8)$$

$$A = a_0 + a_1 S + a_2 S^2 + a_3 S^3 \quad (9)$$

Où :

A : Surface de l'eau stockée ;

S : Volume de stockage.

IV.2.2. Optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par le module RESOPTI

Le module RESOPTI a optimisé les lâchers du barrage de la Cheffia situé sur l'oued de la Bounamoussa. Le fichier du projet RESOPTI et la base de données sont représentés de la manière suivante :

- ✓ Cheffia.rst comme fichier de projet, placé dans le répertoire "Resopti ;
- ✓ Les données disponibles pour la période (1981-2010) durée de 30 années comprenant: les apports, les demandes et les évaporations ;

- ✓ Le volume Min et max, respectivement 30 et 171.992 millions de mètres cubes);
- ✓ Relation volume-surface : $S = 0.008 * V^{0.962}$, où S est exprimée en kilomètres carrés (km²) et V en millions de mètres cubes.

L'expressions mathématique de la fonction objectif utilisée par RESOPTI est celle de maximiser les lâchers à l'aval ; en d'autres termes, il faut minimiser l'écart entre les lâchers et la demande actuelle, cet écart est calculé pour chaque mois (Eq. 1) .

Nous avons appliqué une contrainte sur le volume d'eau dans le barrage ; la réserve a une capacité maximale de $171,992Mm^3$, et les volumes d'eau doivent évidemment être toujours positifs. En d'autres termes, au courant de la gestion et à la fin de chaque mois, le volume ne doit pas descendre en dessous du volume mort ($30Mm^3$), et ne doit pas non plus dépasser la capacité maximale du barrage:

$$\text{Capacité min} \leq \text{Stock (i)} \leq \text{Capacité max}$$

$$0 \leq \text{Lâcher (i)} \leq D \quad i= 1, \dots, N$$

Tous les tableaux de résultats sont donnés en Annexe 1et 2.

IV.2.3. Gestion de l'historique par la programmation dynamique déterministe discrète

La méthode de la programmation dynamique déterministe à été utilisée. La période d'optimisation a été appliquée sur les 30 années de l'historique, période qui s'étale de 1981 jusqu'à 2010, afin d'obtenir les lâchers optima pour les trois secteurs cumulés. Les résultats des taux de satisfactions annuels sont représentés dans la figure suivante :

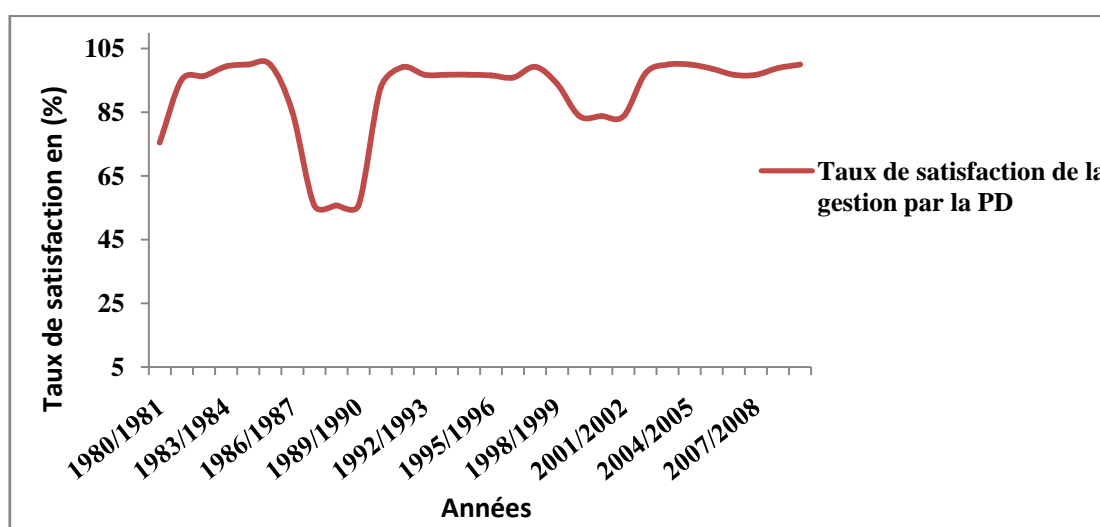


Figure IV.1.Taux de satisfaction annuel de la gestion de l'historique par PDD pour les trois secteurs confondus

Avec un taux de satisfaction global de la gestion égal à 90.90%, nous pouvons dire que la gestion est très satisfaisante. Des baisses du taux de satisfactions aux même périodes que l'historique ont été enregistré, ce qui confirme que quelque soit la politique de gestion utilisée, on ne pouvait pas avoir des taux de satisfaction importants en ces périodes.

Les taux de satisfaction annuels de toutes les politiques gestions sont illustrés par la Figure suivante, nous remarquons que la PDDD parvient à minimiser les déficits lors des périodes de grandes sécheresses.

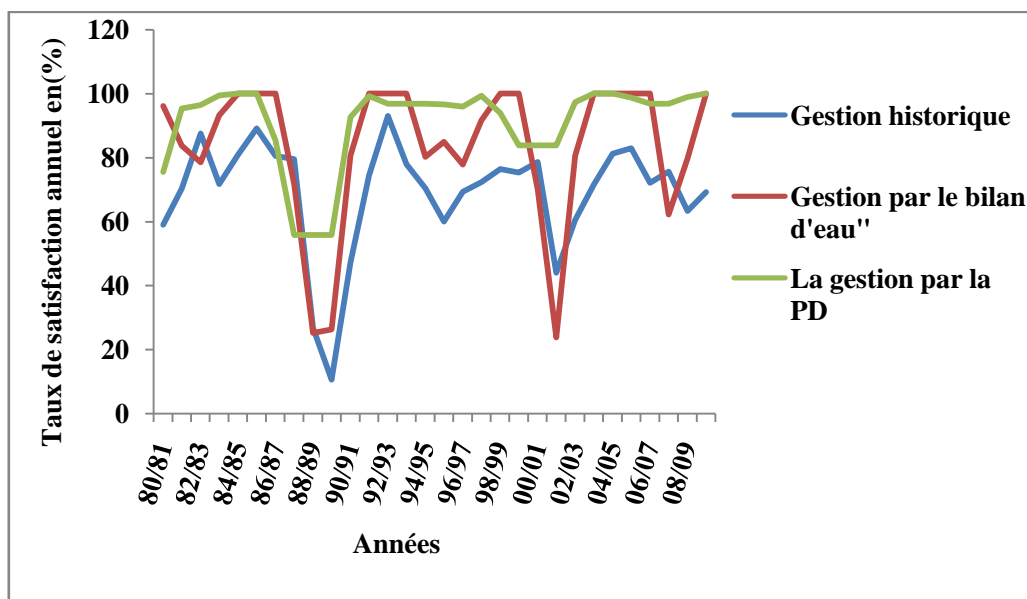


Figure IV.2.Taux de satisfaction annuel global des trois gestions (historique, bilan d'eau et par PDD)

Lors de l'analyse des probabilités des allocations totales, nous avons remarqué que 10 % des allocations sont considérées comme faibles, 83% comme bonnes et seulement 3% sont moyennes (tableau IV.1).

Tableau IV.1.Probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus pour l'historique

Probabilités des Lâchers Totaux			PDD
Bonne	P1	>82	83
Moyenne	P2	[57 82]	3
Faible	P3	< 57	10

Afin d'obtenir les allocations mensuelles de chaque secteur, un dispatching à la main a été fait (tableau IV.2).

Tableau IV.2. Probabilités des allocations annuelles de chaque secteur pour l'historique

	Probabilités par secteur			PDD
	AEP	Bonne	P11	>32
Moyenne		P12	[24,32]	13
Faible		P13	[0,24]	0
AEI	Bonne	P21	>10	76
	Moyenne	P22	[8,10]	13
	Faible	P23	<8	0
Irrigation	Bonne	P31	>40	66
	Moyenne	P32	[25,40]	23
	Faible	P33	<25	10

Pour ce qui est des pénalités annuelles de chaque secteur, Nous avons remarqué que les plus grands pourcentages des allocations sont situés dans la tranche des bonnes satisfactions, avec 86% pour l'AEP, 80% pour l'AEI et 76% et 66% pour l'irrigation. En outre, la tranche des faibles allocations est celle qui contient le moins de valeurs.

IV.3. Optimisation de la gestion historique par les Algorithmes génétiques

IV.3.1. Programmation des Algorithmes Génétiques

IV.3.1.1. 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 : celle-ci 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.3.1.2. Fonction objectif

Une fois la nature des individus déterminée, nous sommes passés à l'élaboration de la fonction objectif du système ; cette dernière devra décrire ce que les individus de la population (ou chromosomes) devraient maximiser ou minimiser. La détermination de cette fonction n'est en général pas chose facile, étant donné 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.3.1.3. 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 signaler 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.3.1.4. Détermination des volumes d'eau dans la réserve

Il est évident que le fait de maximiser l'allocation n'est pas 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 $171,992 Mm^3$, 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 nécessité. 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, c'est celle de générer une vidange. Ce volume relâché dans 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 est calculé grâce aux volumes finaux de chaque mois) ;
- ✓ Fuites (qui sont prises de l'historique, étant donné que nous avons testé ce programme sur les 40 années de l'historique) ;
- ✓ Lame d'eau évaporée.

IV.3.1.5. 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 :

$$\begin{aligned}
 \text{Fitness} &= F_{\text{objectif}} + \text{Pénalité} \\
 \text{Pénalité}(j) &= 500^2 \times \sum_{i=1}^{i=N\text{mois}} g(i) \\
 g(i) &= (V_{\text{mort}}(i) - V_f(i))^2
 \end{aligned}$$

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

IV.3.1.6. 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 $0.8 \times T_{\text{pop}}$.

IV.3.1.7. 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 avons ainsi $0.8 \times T_{pop}$ enfants.

IV.3.1.8. Mutation

Nous avons appliqué l'opérateur de mutation sur les enfants, en se fixant un taux de mutation de 5% (5% des enfants peuvent éventuellement muter). Un nombre aléatoire, y_1 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 est désigné, nous générons y_1 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 y_1 individus qui vont muter.

IV.3.1.9. Sélection pour le remplacement

Après l'évaluation des enfants, nous sommes passés à la sélection pour le remplacement ; une nouvelle génération est 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.3.1.10. 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 aussi 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.3.2. 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 pourrait donner une gestion sur plusieurs années à la fois, ou année par année, pour une même période.

La meilleure gestion serait 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. A partir des différents essais effectués, il en a résulté 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% (tableau IV.3), la gestion11 est intéressante.

Tableau IV.3. 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 une faiblesse.

Tableau IV.4. 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 2009	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 Octobre Novembre et Décembre 2008 et janvier 2009 (Tableau IV.4).

Nous avons en tout sept mois de défaillance. Celle-ci n'excède toutefois pas les 30 Mm³ et s'explique par le fait que l'algorithme prend pour principale 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. Ceci constitue un problème pour l'année de gestion suivante car si celle-ci ne reçoit pas suffisamment d'apport elle serait dans l'obligation d'empiéter sur le volume mort pour satisfaire au moins la demande minimale.

- ✓ **Gestion12** : La période entre 2000 et 2005 est gérée années par années. 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 gestion12 a donc remédié au problème de défaillance. (Tableau ci-dessous) :

Tableau IV.5. 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 IV.6. 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 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 IV.7).

Tableau IV.7. 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 IV.8).

Tableau IV.8. 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 global est de 86%, et il est par conséquent très proche de la gestion 22. En revanche, ce taux de satisfaction aurait pu être plus élevé 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, aurait 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 d'un expert 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 IV.9).

Tableau IV.9. 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 IV.10. 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

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.

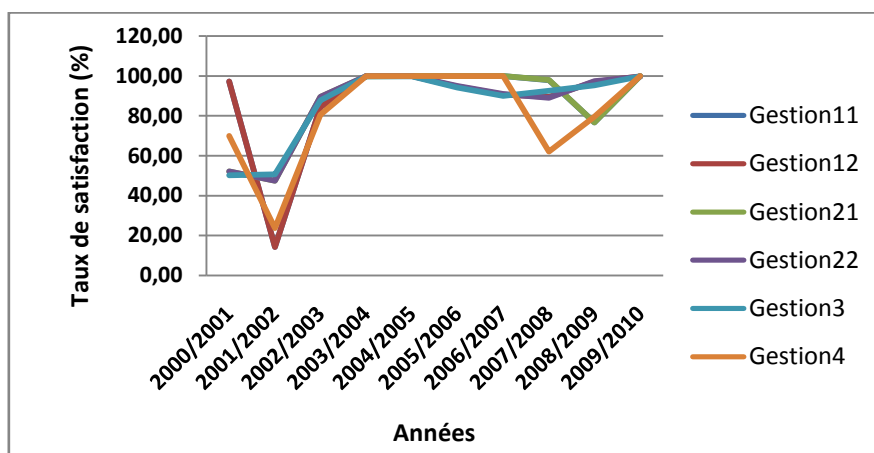


Figure IV.3. Taux de satisfaction des gestions entre 2000 et 2010

IV.3.3. Gestion des 40 années par l’algorithme génétique(AG)

La gestion de l’historique est réalisée par la méthode des algorithmes génétiques. Nous avons employé la méthode de la gestion 3 ; 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 :

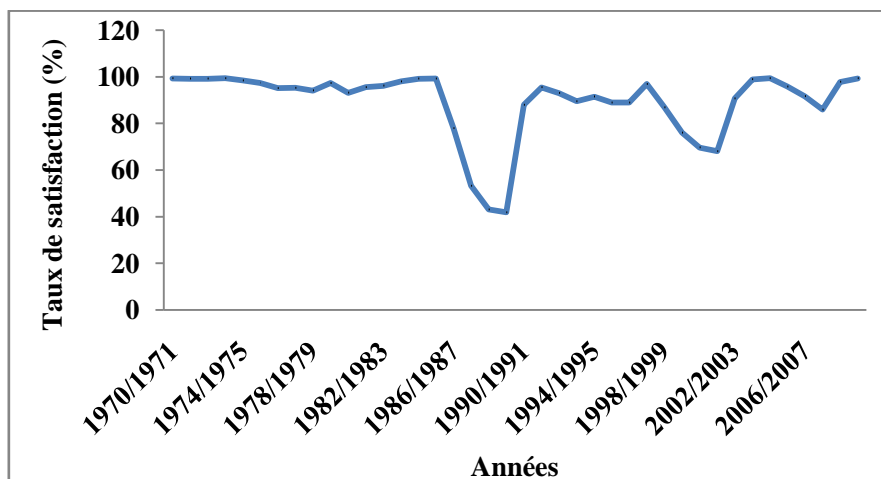


Figure IV.4.Taux de satisfaction annuel de la gestion de l’historique par AG pour les trois secteurs confondus

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 par le bilan d’eau, 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 IV.5), nous remarquons que les algorithmes génétiques parviennent à minimiser les déficits lors des périodes de grandes sécheresses.

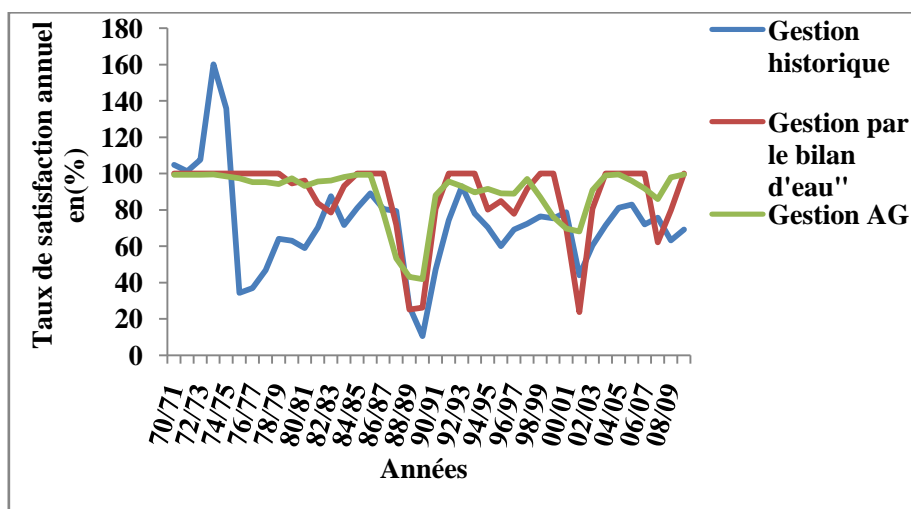


Figure IV.5. Taux de satisfaction annuel global des trois gestions (historique, bilan d'eau et par AG)

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 par le bilan d'eau.

En outre, alors que la gestion par le bilan d'eau 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 allocations totales, nous remarquons que seulement 7.5% des allocations sont considérées comme faibles, 83% comme bonnes et 10% sont moyennes (tableau IV.11).

Tableau IV.11. Probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus pour l'historique

Probabilités des Lachers Totaux			AG
Bonne	P1	>82	82.5
Moyenne	P2	[57 82]	10
Faible	P3	< 57	7.5

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

Tableau IV.12. Probabilités des allocations annuelles de chaque secteur pour l'historique

Probabilités des Lâchers Totaux			AG
Bonne	P11	>32	90
Moyenne	P12	[24,32]	7.5
Faible	P13	[0,24]	2.5
Bonne	P21	>10	80
Moyenne	P22	[8,10]	15
Faible	P23	<8	5
Bonne	P31	>40	80
Moyenne	P32	[25,40]	12.5
Faible	P33	<25	7.5

Pour ce qui est des pénalités annuelles de chaque secteur (tableau IV.12), nous avons remarqué que les plus grands pourcentages des allocations 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 allocations est celle qui contient le moins de valeurs.

Tableau IV.13. Comparaison des probabilités des allocations annuelles de chaque secteur pour les trois gestions

Pénalités des Lachers Totaux			Historique	Bilan d'eau	AG
bonne	P11	>82	30.77	82.5	82.5
Moyenne	P12	[57 82]	51.28	7.5	10
Faible	P13	< 57	17.95	10	7.5

Ainsi, en comparant les trois gestions en termes de pénalités annuelles globales (Tableau IV.13), nous remarquons qu'au cours de la gestion historique, la probabilité d'avoir de bons taux de satisfaction est très faible, alors que les deux gestions (par le bilan d'eau et par AG) parviennent à augmenter cette probabilité de 42%, ce qui n'est pas négligeable.

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

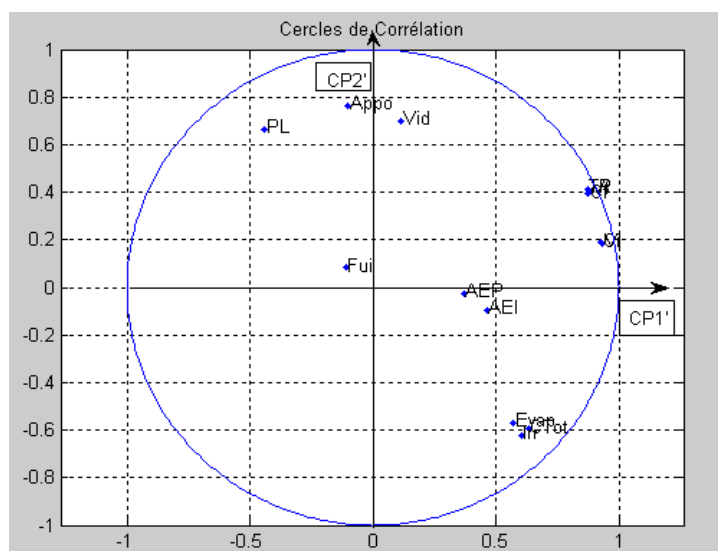


Figure IV.6. Cercle de corrélation de la CP1' et CP2' pour la gestion par AG

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.

IV.4. Comparaison des deux gestions (programmation dynamique et algorithme génétique)

La période d'optimisation a été appliquée sur les 30 années de l'historique afin d'obtenir les lâchers optima pour les trois secteurs cumulés et cela par les deux gestions (PDD et AG). La critique a été faite, en premier lieu, en termes de probabilité d'apparition des allocations (pénalités) et de taux de satisfactions et, en deuxième lieu, par les indices de performance du barrage à savoir les indices de fiabilité, de vulnérabilité et de résilience.

Nous avons employé la méthode de la gestion 3. Cette gestion a été appliquée sur 30 années, avec une seule exécution pour les deux gestions : programmation dynamique et algorithme génétique. Aussi, une comparaison a été entreprise.

IV.4.1. Comparaison des probabilités et des taux de satisfaction

En comparant la gestion par la PDD à celle de l'AG en termes de probabilités de satisfaction des trois secteurs confondus, nous avons remarqué un accroissement de 4% et 13 % des allocations totales situées dans les tranches des bonnes et moyennes satisfactions respectives. En effet, nous sommes passés de 83% en gestion par PDD à 87% en gestion par AG et de 3 % en gestion par PDD à 16 % en gestion par AG. Pour ce qui est des faibles satisfactions, il n'y a donc aucune allocation annuelle considérée comme étant faible pour la

gestion par l'AG. Par contre, nous avons enregistré un pourcentage de 10 % en gestion par la PDD. Nous pouvons expliquer qu'en premier lieu, la gestion par l'AG a donné un résultat satisfaisant. Lorsque nous avons appliqué ce calcul de probabilités, nous avons obtenu le tableau suivant :

Tableau IV.14. Comparaison des probabilités des allocations annuelles des trois secteurs confondus obtenues par la programmation dynamique et l'algorithme génétique

Probabilités des Lâchers Totaux			PDDD	AG
Bonne	P1	>82	83	87
Moyenne	P2	[57 82]	3	16
Faible	P3	< 57	10	0

La figure ci- dessous montre la variation des taux de satisfaction annuels des deux gestions, Avec un taux de satisfaction global de la gestion par la PDD égale à 90.90% et un taux de la gestion par AG égale à 92.12%, soit un accroissement de presque 3 % nous remarquons toutefois des baisses du taux de satisfactions aux mêmes périodes que l'historique

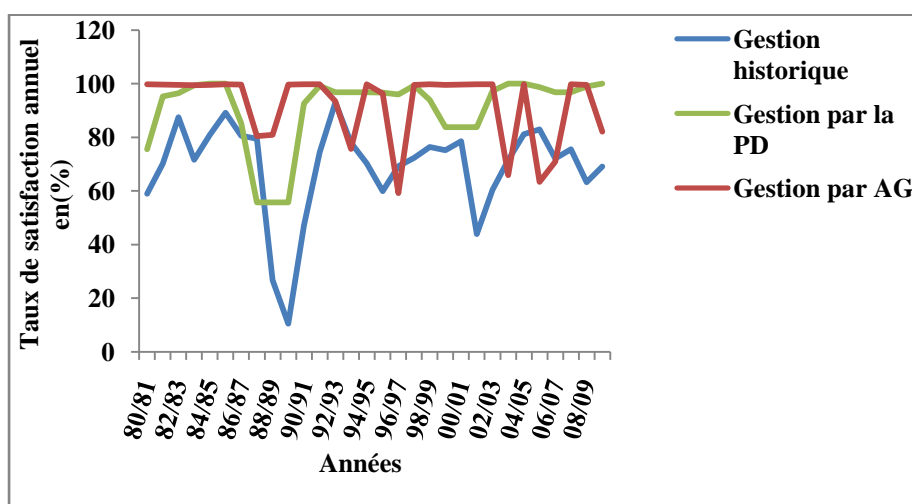


Figure IV.7. Comparaison des taux de satisfactions annuels des gestions par PDD et AG

Ainsi, les taux de satisfactions annuels les plus faibles atteignent 55% pour la PDD et 64 % pour l'AG, ce qui représente 9 % de plus que la gestion par PDD.

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 des résultats

satisfaisants, c'est parce qu'ils arrivent à anticiper les périodes de sécheresse. Ainsi, les pics de déficit des AG sont moins importants que ceux de la gestion par la PDD et l'historique.

En outre, alors que la gestion par la PDD 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 futures, et à minimiser l'impact de la sécheresse à l'aval.

Les résultats des allocations mensuelles de chaque secteur sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau IV.15. Comparaison des Probabilités annuelles pour chaque secteur des gestions par la programmation dynamique et l'algorithme génétique

	Probabilités par secteur			PDD	AG
AEP	Bonne	P11	>32	86	86
	Moyenne	P12	[24,32]	13	13
	Faible	P13	[0,24]	0	0
AEI	Bonne	P21	>10	76	76
	Moyenne	P22	[8,10]	13	23
	Faible	P23	<8	0	0
Irrigation	Bonne	P31	>40	66	73
	Moyenne	P32	[25,40]	23	26
	Faible	P33	<25	10	0

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

Nous remarquons que pour les trois secteurs et pour les deux gestions (PDD et AG), le plus grand pourcentage des allocations est situé dans l'intervalle des bonnes satisfactions. Avec 86% 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'AEP et de l'AEI sont égales pour les deux gestions et sont de 86% et 76% respectivement.

Pour ce qui est des faibles satisfactions, il n'y a donc aucune allocation annuelle considérée comme étant faible pour la gestion par l'AG et la PDD pour l'AEP et l'AEI. Pour l'irrigation, un accroissement de 7 % a été noté pour les probabilités d'avoir de bonnes satisfactions pour la gestion par l'AG ; par contre la probabilité d'avoir de faibles satisfactions est nulle pour la gestion par l'AG et elle est de 10% pour la gestion par la PDD. Les résultats sont ainsi intéressants, et satisfaisants pour la gestion par l'AG. Néanmoins, malgré la performance de l'AG, la comparaison des probabilités et des taux de satisfaction ne suffit pas pour évaluer la performance de la gestion du barrage, nous avons été dans l'obligation de

passer à la deuxième étape de comparaison. Il s'agit de l'évaluation de la performance de la gestion par le calcul d'un certain nombre d'indices. La comparaison est faite pour les deux méthodes de gestion à savoir l'algorithme génétique et la programmation dynamique.

IV.4.2. Comparaison des indices de performance des deux gestions (AG et PDD)

L'introduction d'indices de performance permet de juger de la qualité de la règle de la gestion optimisée. Il ne suffit pas de créer une règle de gestion, mais il faut aussi 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 indices le plus souvent utilisés pour évaluer la performance d'un réservoir sont la fiabilité basée sur le temps et la fiabilité basée sur la quantité (volume). Hashimoto et coll. (1982) ont proposé deux critères en plus : la résilience et la vulnérabilité, ces deux critères permettent de mesurer les aspects qui ne sont pas évalués par la fiabilité.

Les indices de performance 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 détermination de la règle de gestion. Ces incidents vont être décrits selon trois indices de performance caractérisant l'intensité, la durée et la fréquence du phénomène.

Une fois que les règles de gestion optimisées des deux méthodes sont déterminées, un certain nombre d'indices est calculés. L'ensemble de ces indices choisi fournit une information additionnelle à propos de l'analyse de la performance du barrage en ce qui concerne, les probabilités des allocations et le taux de satisfaction. Ces indices sont calculés à partir des données mensuelles ou annuelles. Le choix s'est porté sur les indicateurs suivants :

- ✓ *Indices de fiabilité* : Fiabilité basée sur le temps (IF_1) et Fiabilité basée sur la quantité (IF_2), somme rapportée à la variance de la déviation à la cible au carré (IF_3) ;
- ✓ *Indices de vulnérabilité* : Le déficit mensuel maximum (Iv_1), le déficit annuel maximum (Iv_2), Somme des déficits au carré (Iv_3), Le déficit total enregistré (Iv_4), déversement (Iv_5).
- ✓ *Indices de résilience* : Durée de déficits consécutifs (IR)

Les résultats de calcul des ces différents indices sont montrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.16. Résultat de calcul des indices de performance par les deux méthodes de gestion

	Indices de performance	AG	PDD
Fiabilité	Fiabilité basée sur le temps (IF ₁) (en %)	60	37.78
	Fiabilité basée sur la quantité (IF ₂) (en %)	93	90.9
	Somme rapportée à la variance de la déviation à la cible au carré(IF ₃)	4	5.2
Vulnérabilité	Le déficit annuel maximum(Mm ³ /mois et %de la demande)(Iv ₁)	41.65 (40.85)	45.07 (44.20)
	Le déficit mensuel maximum (Iv ₂) (Mm ³ /mois et %de la demande)	4.7 (50.37)	7.78 (75.31)
	Somme des déficits au carré (Mm ³ /mois) (Iv ₃)	589.645	819.24
	Le déficit total enregistré(Iv ₄)	241.11	278.22
	Déversement (en Mm ³)(Iv ₅)	155.393	1184.66
Résilience	Durée de déficits consécutifs (IR)	25	65

Les défaillances enregistrées dans le fonctionnement d'un réservoir ont plusieurs aspects: nombre, étendue et gravité. Dans ce qui suit, les indices de fiabilité, la résilience et la vulnérabilité sont calculés pour mesurer les différents aspects de la performance du barrage-réservoir de la Cheffia.

Pour que le système soit capable de satisfaire la pleine demande de l'objectif, durant toute la période, l'indice de probabilité dans le temps (IF₁) a été calculée. Il est de 60% pour la gestion par l'algorithme génétique et de 37.78% pour la gestion par la programmation dynamique tableau (IV.16). Cet indice indique la fréquence des lâchers d'eau qui peuvent satisfaire leurs demandes ciblées. Nous avons remarqué une faible valeur de (IF₁) pour la gestion par la programmation dynamique. Selon l'étude de LEBDI, (2010), une faible valeur ne décrit pas réellement la sévérité des déficits d'une politique de gestion, mais elle décrit seulement la fréquence avec laquelle le barrage est incapable de satisfaire la pleine demande de l'objectif au cours d'une période de temps donnée.

Nous avons aussi noté que l'indice de fiabilité (IF₂), qui est basé sur la quantité ou le volume, est de 93% pour l'AG et de 90% pour la PDD. Cet indice indique la base pour

l'estimation de la fourniture nette (lâchers nets) quand la demande ciblée est déjà connue. Ces lâchers ne peuvent pas être plus grands que la cible, c'est une condition imposée dans la fonction objectif des deux modèles d'optimisation ; cet indice est toujours compris entre 0 et 1.

L'indice de la somme rapportée à la variance de la déviation à la cible au carré (IF_3) quant à lui, décrit le degré de sévérité que le lâcher dévie par rapport à la demande ciblée. Mathlouthi, (2010) a expliqué que cet indice est généralement accepté en statistique et en gestion des barrages-réservoirs, et que les grands déficits devraient être pénalisés plus sévèrement que les petits déficits. La pondération est faite en élevant au carré la valeur absolue de la déviation à la cible. Budhakooncharoen, (1990) a ajouté que si $(IF_3) = 0$, la performance de la politique de gestion correspondante est parfaite à 100%, et quand $(IF_3)=1$ cela signifie qu'aucun lâcher n'est fourni durant la période de gestion considérée.

Dans le cas du barrage de la Cheffia, la valeur de (IF_3) égale à 0.04 pour la gestion par l'AG et à 0.052 pour la gestion par la PDDD ; cela signifie que les règles de gestion issues des deux méthodes d'optimisation sont performantes à un degré d'efficacité très satisfaisant, ce degré d'efficacité est de 99.96% pour l'AG et de 99.90% pour la PDDD, la valeur de cet indice est presque identique pour les deux méthodes utilisées.

D'après les auteurs Ali Ahmed (2005); Jain, (2008), (2010) et Oskoui, (2015); les indices de la fiabilité sont insuffisants pour pouvoir conclure qu'un événement rare ou extrême d'un déficit puisse survenir au cours de la durée de vie des réservoirs. Ces indices ne décrivent pas réellement la sévérité des déficits d'une politique de gestion d'où la nécessité d'aller plus loin dans l'analyse et d'introduire d'autres indices de performance à savoir la vulnérabilité et la résilience, ces deux aspects ne sont pas évalués par la fiabilité.

La vulnérabilité est la mesure qui décrit l'ampleur du plus grand record d'événement de déficits. Selon Sharad (2010), la vulnérabilité mesure la sévérité des échecs et indique s'ils se produisent ou pas, et quand ils se produisent ? La combinaison des trois paramètres : apports, demandes et capacité de stockage, explique très bien la sévérité des échecs ou des déficits. Le même auteur explique que plus le déficit est grand plus le réservoir serait fortement vulnérable. Selon Kjeldsen et Rosbjerg (2004), la vulnérabilité estimée est expliquée comme étant la valeur moyenne des événements de déficit par contre, Kundzewicz et Kindler (1995) ont suggéré que l'utilisation d'un événement maximum pourrait donner une meilleure estimation de la vulnérabilité.

Dans cette étude, la vulnérabilité a été expliquée en termes de déficit maximum enregistré pendant le mois, l'année et pendant toute la période de gestion. La somme des déficits au carré et les déversements sont aussi analysés. D'après le tableau des résultats (tableau IV.16), nous avons remarqué que l'algorithme génétique a enregistré les meilleurs volumes autrement dit les déficits calculés sont inférieurs à ceux calculés par la programmation dynamique. Nous pouvons dire que l'AG a pu minimiser les déficits, en d'autres termes, il a contribué à maximiser les lâchers à l'aval. Concernant la somme des déficits au carré, nous avons remarqué que la gestion par le modèle AG donne une petite somme de déficit par rapport aux règles de gestion dérivées par le modèle de la programmation dynamique. Une petite valeur de cet indice indique que le déficit est réparti uniformément entre les mois. Ceci est très avantageux du point de vue de la gestion.

Quant à la résilience, c'est une métrique qui indique la rapidité qu'un système récupère après une défaillance. Un bon système revient rapidement à un état satisfaisant après un échec. Moy et al. (1986) ont défini la résilience comme étant la durée maximale consécutive d'un système restant dans l'état insatisfaisant. Selon Kundzewicz et Kindler (1995), l'estimation de la résilience basée sur la valeur maximale est meilleure que l'estimation de la valeur moyenne parce que les petits événements insignifiants peuvent abaisser la valeur moyenne.

Le tableau IV.16 montre que la résilience des lâchers d'eau est de 25 mois pour les règles de gestion issues de l'AG et elle est de 65 mois pour les règles de gestion issues de la PDDD ; cela est peut être expliqué comme suit :

La gestion par la PDD a enregistré une résilience de 65 mois, pendant cette période les utilisateurs de l'eau feront face à une longue période de déficit, en effet, le temps maximum de rétablissement de la défaillance pour satisfaire la demande en eau prend 65 mois, par contre ce temps maximal est de 25 mois seulement pour la gestion par l'AG.

Nous pouvons dire que le gestionnaire ou le décideur doit choisir la politique de gestion la plus satisfaisante pour gérer d'une manière convenable la quantité d'eau disponible dans le barrage réservoir.

IV.5. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir de l'optimisation de la gestion de l'eau du barrage de la Chaffia. En utilisant les politiques de gestion issues par le modèle AG et le modèle PDD, une comparaison a été faite entre ces deux méthodes, en termes de probabilité d'apparition des allocations (pénalités), et de taux de satisfactions et aussi en termes d'indices de performance du barrage, à savoir les indices de fiabilité, de vulnérabilité et de résilience.

En analysant les différences entre les deux gestions, nous avons remarqué 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 allocations dans les périodes humides.

La performance de ces politiques de gestion est comparée sur la base d'un certain nombre d'indices de performance. La comparaison entre tous les indices de performances a révélé qu'il est essentiel de tenir compte de la fiabilité comme informations pour le décideur dans le domaine de la gestion des barrages réservoirs. En outre, la résilience et la vulnérabilité sont deux mesures importantes que le décideur doit leur donner une considération particulière, puisque ces deux indices sont des mesures du plus grand et du plus sévère déficit.

La recherche avec l'AG et la PDD a menée à l'optimum. La politique de gestion dérivée de l'AG est prometteuse et compétitive en la comparant avec la PDD, et peut être efficacement utilisé pour dériver les politiques de gestion pour d'autres barrages-réservoirs. Les aspects liés aux divers aspects de fiabilité, de résilience et de vulnérabilité de performance se révèlent être fréquemment essentiels dans le choix final de la stratégie de gestion à utiliser.

Chapitre V : Simulation et optimisation future

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.

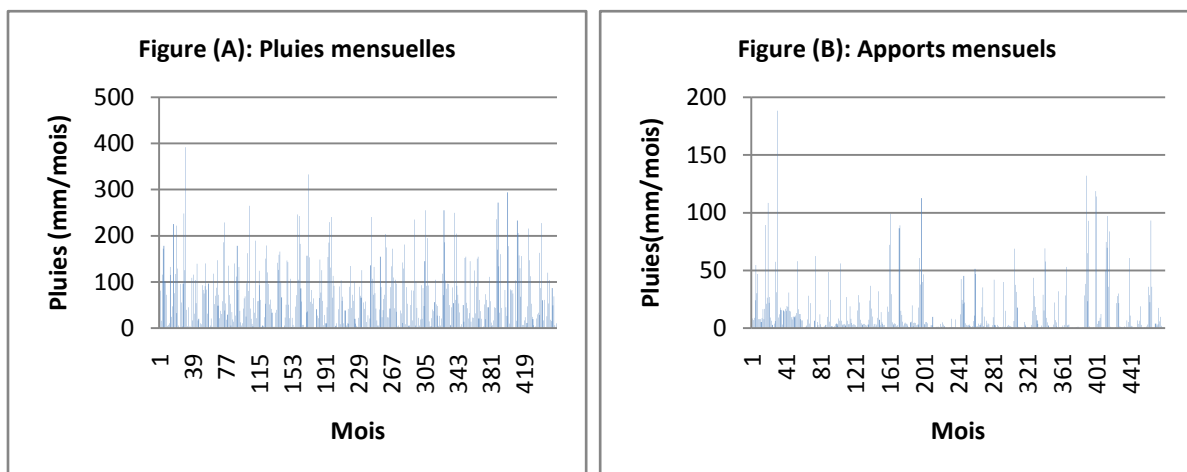


Fig. n° V.1: Représentation de l'évolution des paramètres hydrologiques dans le temps.

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 une modélisation. Parmi les modèles existants, nous pouvons citer les chaînes de Markov et le modèle GR2M.

Nous avons choisi de simuler les débits par un modèle conceptuel et le modèle choisi fut le modèle GR2M, développé par Mouelhi (2003) et Moulehi et al. (2006).

V.2.1. 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 la figure suivante :

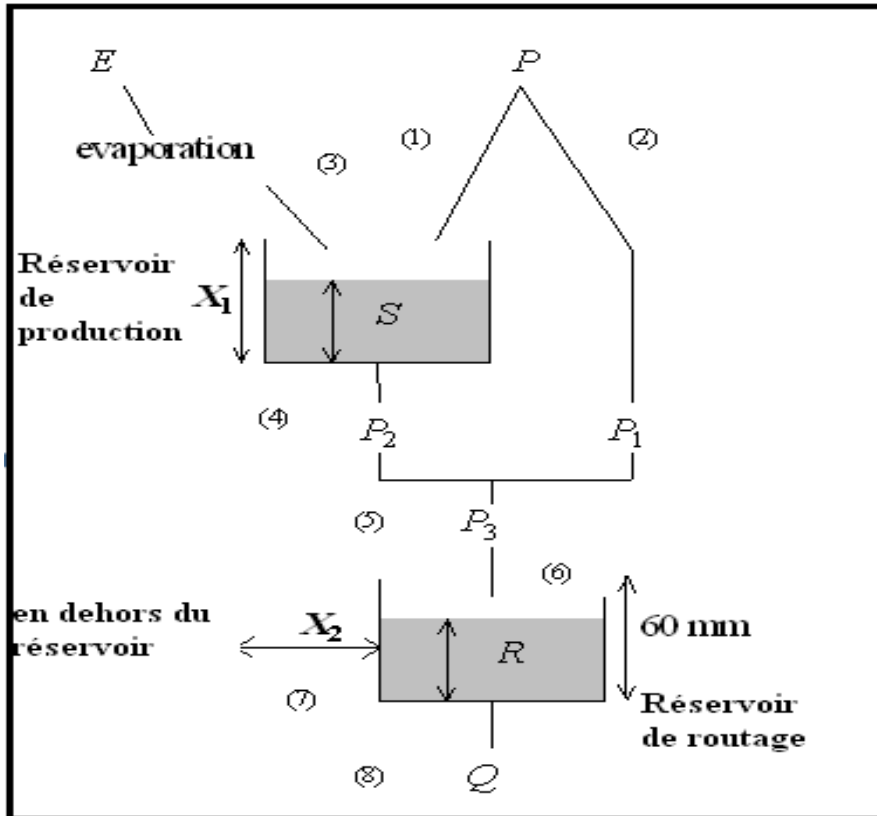


Fig. n° V.2 : Représentation des étapes du modèle (Source : Moulehi et al. (2006))

Les étapes sont expliquées par les équations ci-dessous :

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

$$S1 = \frac{S + X1 \times \psi}{1 + \psi \frac{S}{X1}} \quad \text{Avec : } \psi = \tanh\left(\frac{P}{X1}\right) \quad (1)$$

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

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

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

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

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

Le deuxième réservoir reçoit une quantité de pluie P3 :

$$P3 = P1 + P2 \quad (5)$$

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

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

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

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

Le débit sera donc écrit sous la forme :

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

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.2.1.1. 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 carrée dans le cas du critère quadratique. Le critère RMSE est défini comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (Q_{iobs} - Q_{isim})^2}$$

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

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

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.2.1.2. 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.2.2. Simulation des pluies

V.2.2.1. 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.2.2.1.1. 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.2.2.1.2. 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.2.2.1.3 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 $i+1$.

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.

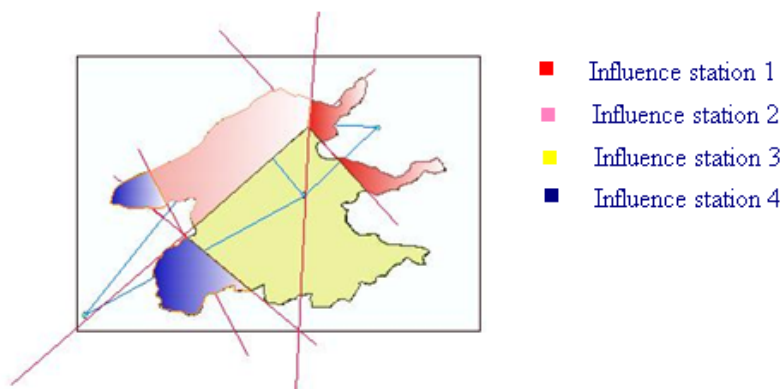


Fig. n° V.3 : Représentation des zones d'influence des stations pluviométriques

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

Tableau n° V.1: Coefficient de pondération des pluies des stations pluviométriques considérées

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.2.2.2. 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 :

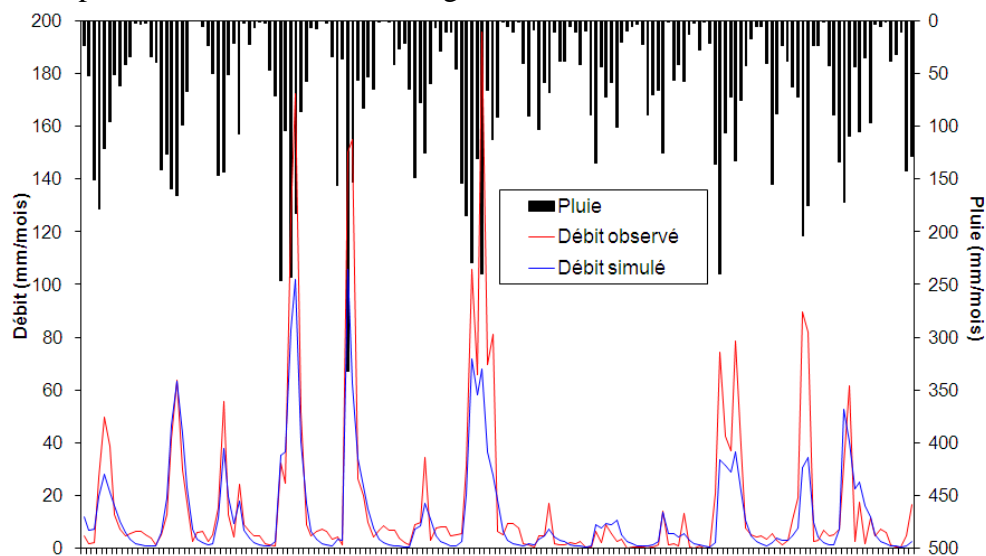


Fig. n° V.4. : Calage des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M

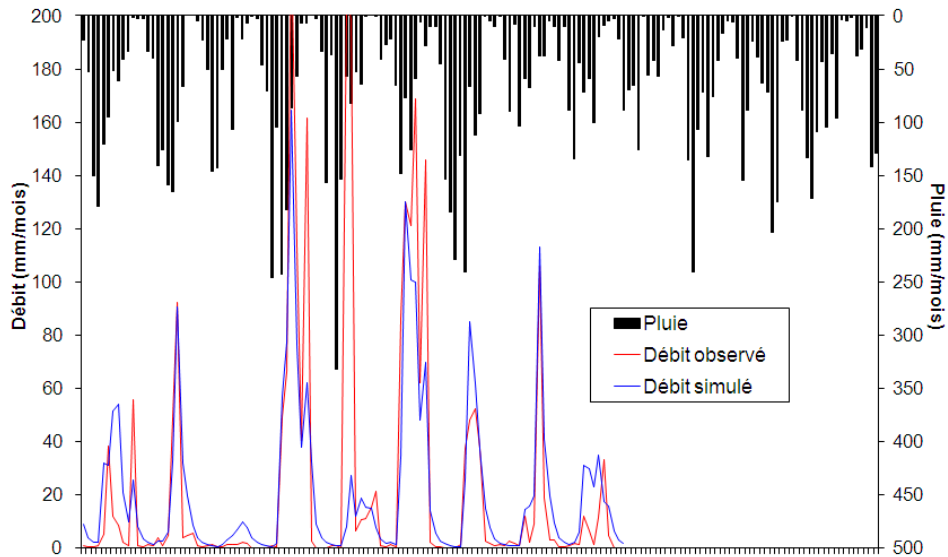


Fig. n° V.5 : Validation des débits issus de la pluie pondérée par le modèle GR2M

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.

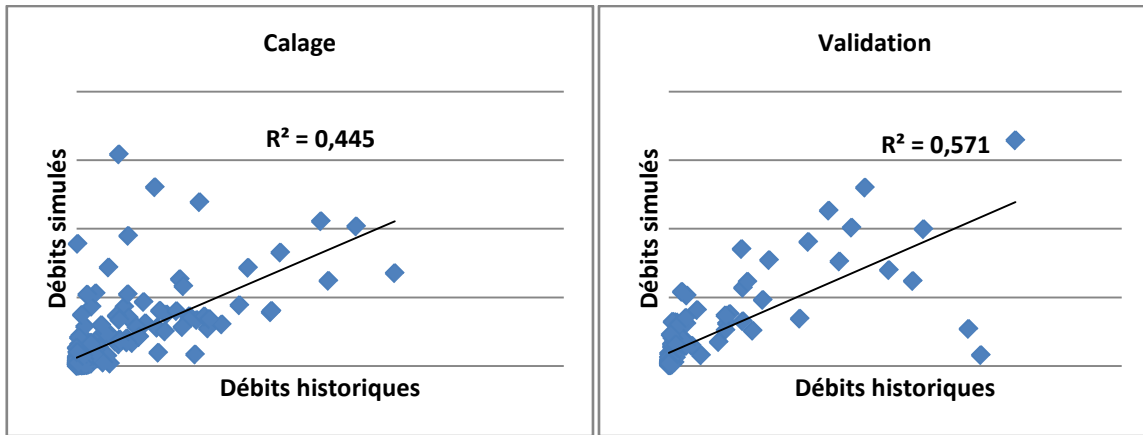


Fig. n° V.6: Corrélations entre débits observés et débits simulés issus du modèle GR2M utilisant la pluie pondérée.

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 coefficients de détermination et de corrélation sont résumés dans le tableau n°V.4, 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.

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, 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.2.2.3. 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.

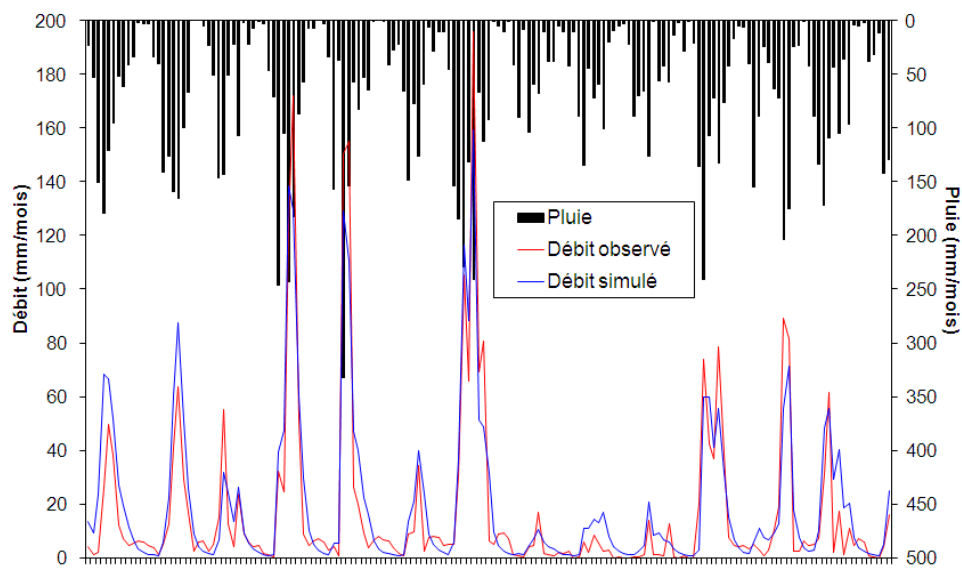


Fig. n° V.7. : Calage des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.

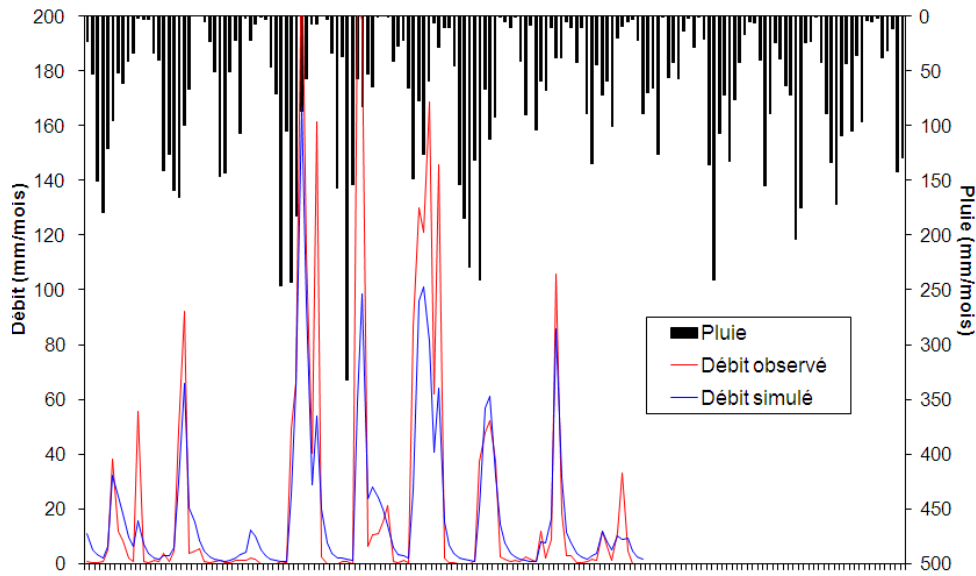


Figure n° V.8 : Validation des débits issus de la pluie du pluviomètre du barrage par le modèle GR2M.

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 VI.9) entre débits observés et simulés sont très satisfaisants ; Ils dépassent ainsi les 90% pour les deux périodes, on ne donc peut pas 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 dans la figure V.9.

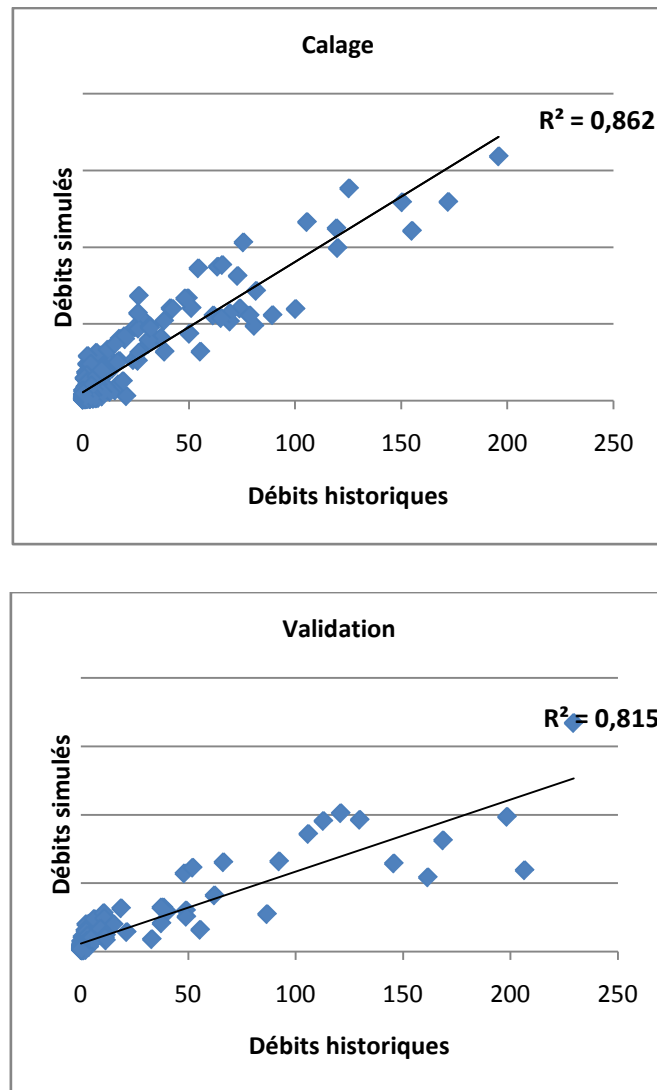


Fig. n° V.9 : Corrélation entre débits historiques et simulés par le modèle GR2M appliqué au pluviomètre du barrage.

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.2.3. 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. Nous avons 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.

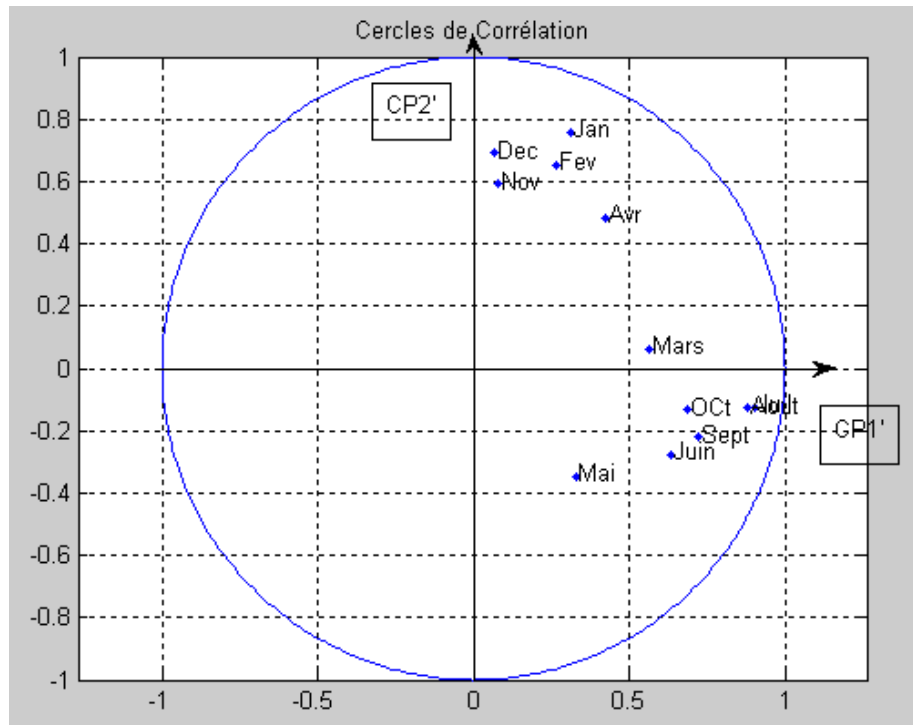


Fig. n° V.10: Cercle de corrélation de la CP1' à la CP2' pour les débits mensuels

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. Nous pouvons trouver les limites des classes, en mm, pour chaque saison. Tous les résultats sont donnés en annexe 3.

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 tableau V. 7, à savoir 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.7 : 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

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.

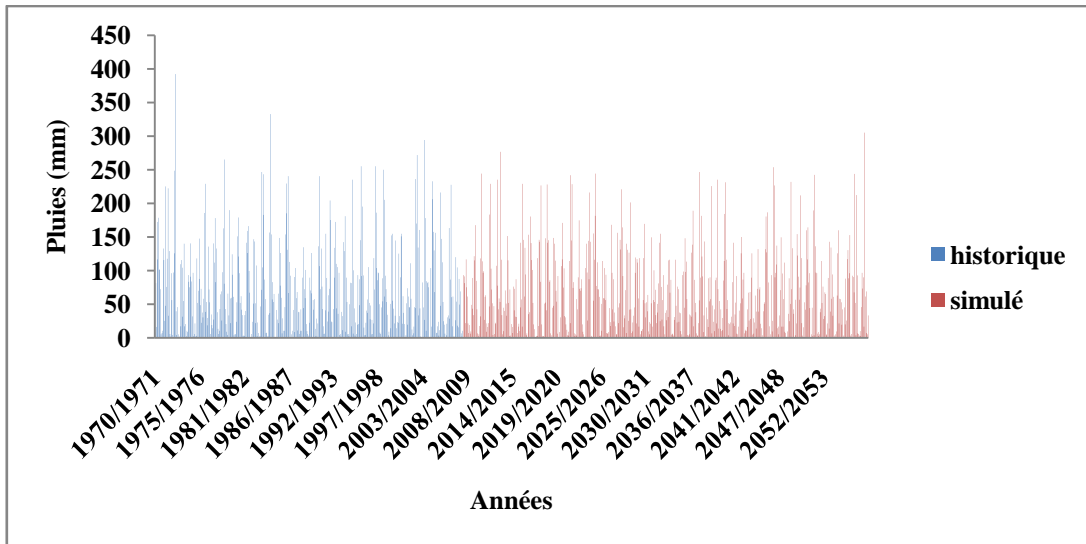


Fig. n° V.11 : Représentation dans le temps des pluies historiques et simulées par le modèle markovien multi-classes (pluviomètre barrage).

V.2.4. 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 :

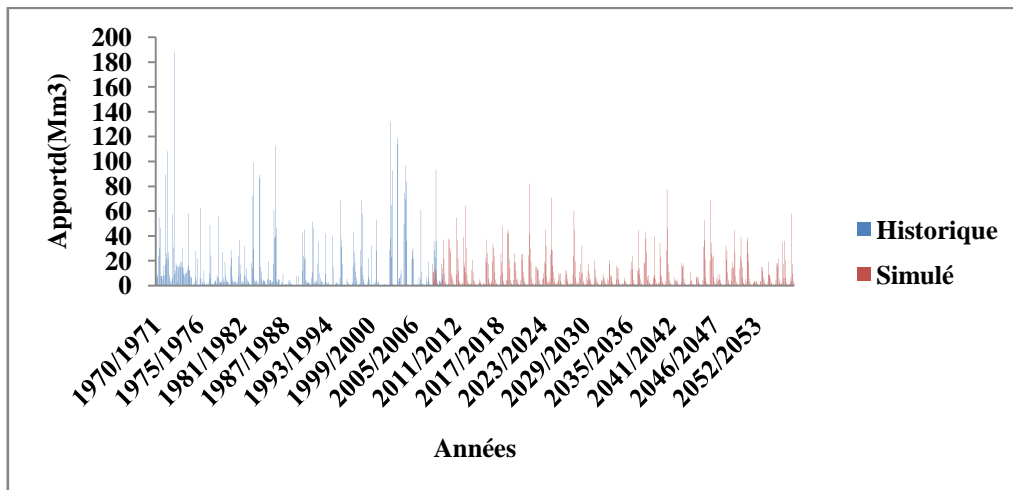


Fig. n° V.12 : Représentation dans le temps des débits historiques et simulés par le modèle GR2M.

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 $143 Mm^3$

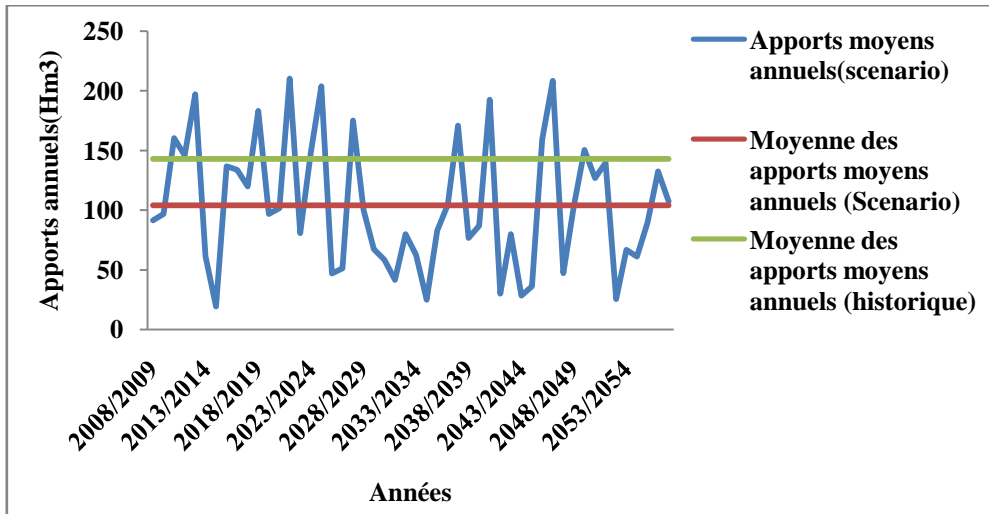


Fig. n° V.13 : Représentation des apports moyens annuels du scénario.

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 Mm^3 contre un surplus de 226 Mm^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 défavorable.

V.3. 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 :

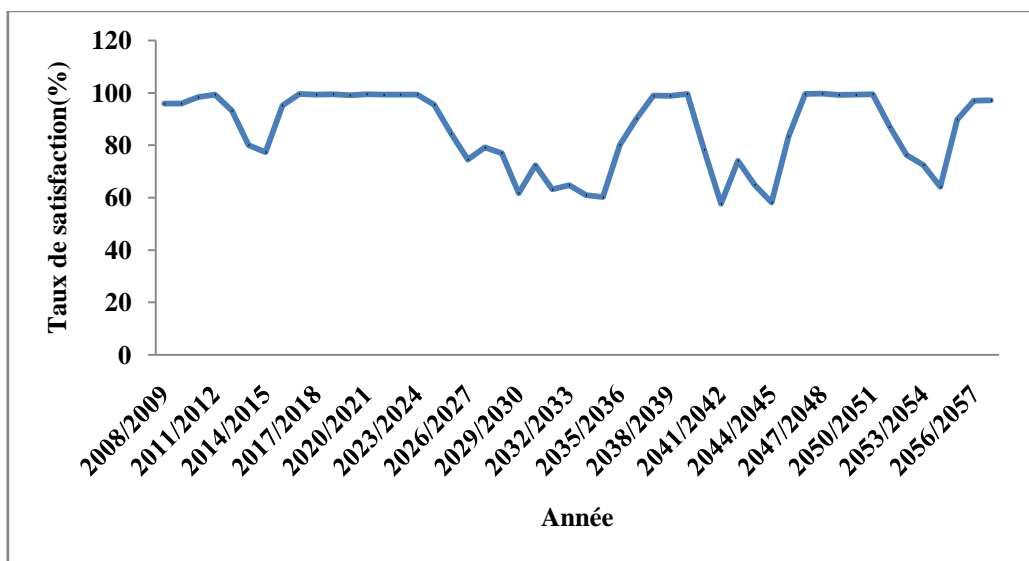


Fig. n° V.14 : Taux de satisfaction annuel du scénario simulé pour les trois secteurs confondus

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 allocations annuelles des trois secteurs confondus, elles sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau n° V.8 : Pénalités des allocations annuelles des trois secteurs confondus pour le scénario futur.

Pénalités des lâchers Totaux			Scénario
Bonne	P1	>82	60
Moyenne	P2	[57 82]	40
Faible	P3	< 57	0

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

Comme pour la gestion historique effectuée par les algorithmes génétiques, les allocations de chaque secteur sont allouées avec les mêmes priorités, à savoir : prendre les allocations 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 allocations annuelles pour chaque secteur.

Tableau n° V.9 : Pénalités des allocations annuelles de chaque secteur pour le scénario futur.

Pénalités des lâchers Totaux			Scénario
Bonne	P11	>32	76
Moyenne	P12	[24 32]	22
Faible	P13	[0 24]	2
Bonne	P21	>10	56
Moyenne	P22	[8 10]	18
Faible	P23	<8	26
Bonne	P31	>40	58
Moyenne	P32	[25 40]	40
Faible	P33	<25	2

Nous remarquons que pour les trois secteurs, le plus grand pourcentage des allocations 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 égales 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 allocations 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 artificiels.

V.4. Amélioration du modèle par les réseaux de neurones artificiels

V.4.1. 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 allocations 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 représentés en annexe 4

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 Sigmoide.

$$\text{Sig}_i = \frac{1}{(1 + e^{-s_i})}$$

4. Calcul des allocations pour chaque secteur

Tableau n° V.10 : Calcul des valeurs des neurones de sorties.

Secteur	Equation de calcul
AEP	$Y1 = \sum_{i=1}^{13} (W_{i,1} \times \text{Sig}_i) + B_1^2$
Irrigation	$Y2 = \sum_{i=1}^{13} (W_{i,2} \times \text{Sig}_i) + B_2^2$
AEI	$Y3 = \sum_{i=1}^{13} (W_{i,2} \times \text{Sig}_i) + B_3^2$

V.4.2. 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.11 : 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.

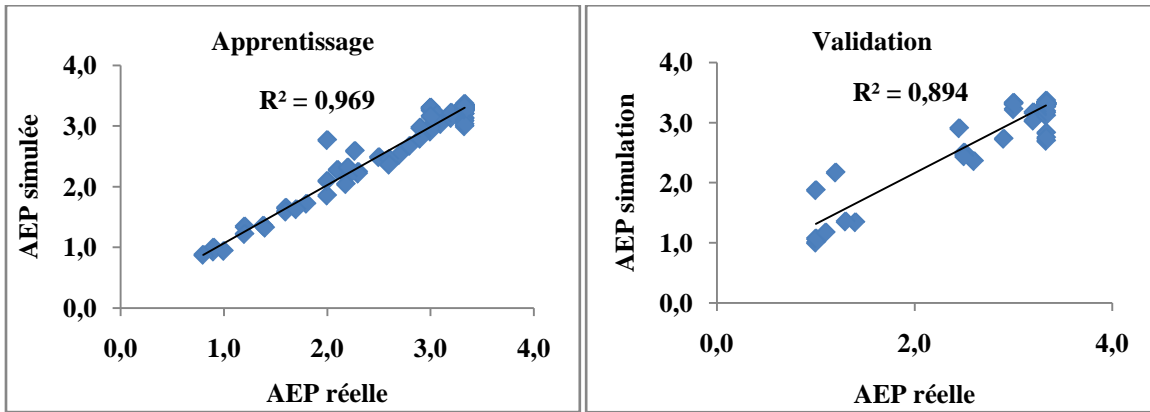


Fig. n° V.15 : Corrélation entre allocations par le bilan d'eau et allocations simulées par les Réseaux de Neurones pour l'AEP

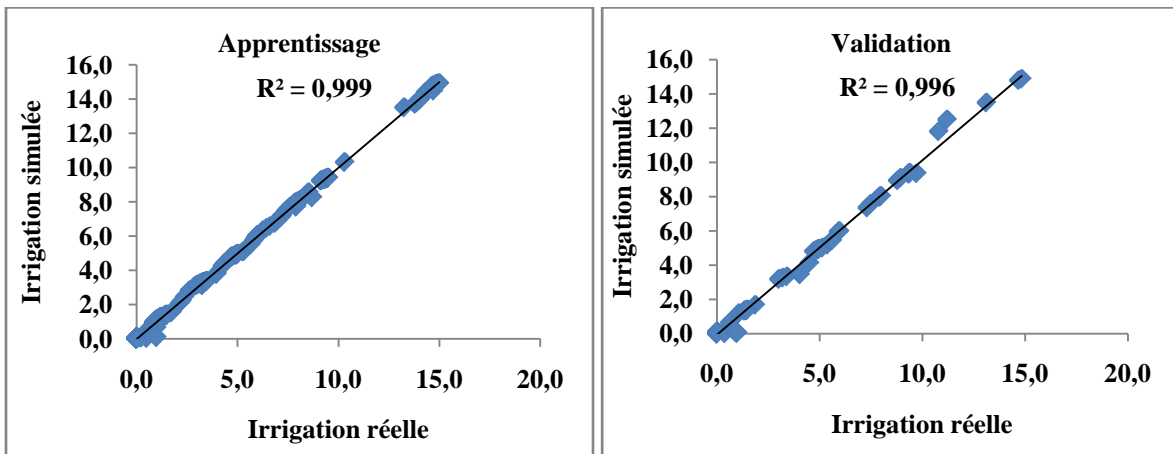


Fig. n° V.16 : Corrélation entre allocations par le bilan d'eau et allocations simulées par les Réseaux de neurones pour l'Irrigation

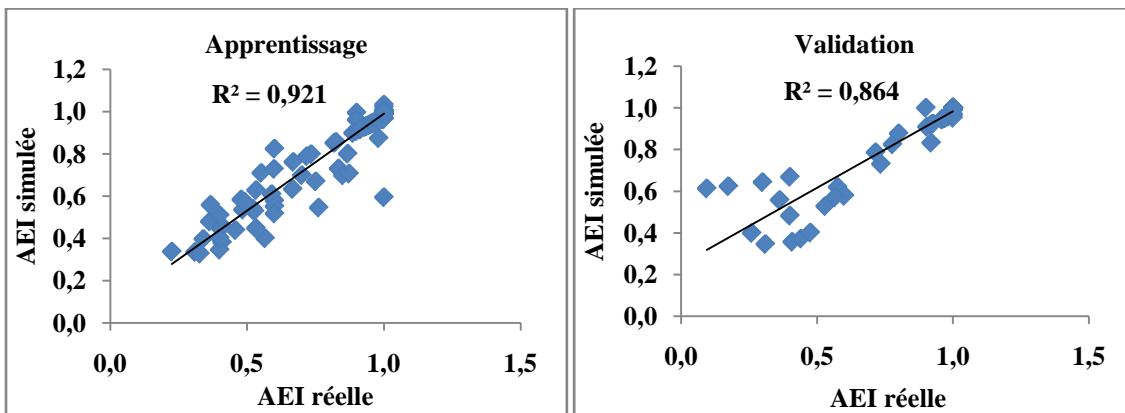


Fig. n° V.17 : Corrélation entre allocations par le bilan d'eau et allocations simulées par les Réseaux de Neurones pour l'AEI

Le tableau suivant représente les pénalités des allocations annuelles des différents secteurs pour les deux répartitions : par le bilan d'eau et par RN.

Tableau n° V.12: Comparaison des pénalités annuelles des trois secteurs pour les répartitions par le bilan d'eau et par Réseaux de Neurones.

			Bilan d'eau	RN
Bonne	P11	>32	76	82
Moyenne	P12	[24,32]	22	18
Faible	P13	[0,24]	2	0
bonne	P21	>10	56	64
Moyenne	P22	[8,10]	18	36
Faible	P23	<8	26	0
Bonne	P31	>40	58	54
Moyenne	P32	[25,40]	40	36
Faible	P33	<25	2	10

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 par le bilan d'eau 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 allocations 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 V.12. Les figures représentant les allocations pour chaque secteur, et pour chaque méthode, nous ont montré que la tendance des allocations par la méthode des réseaux de neurones suit très bien celle de l'allocation par le bilan d'eau. 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.

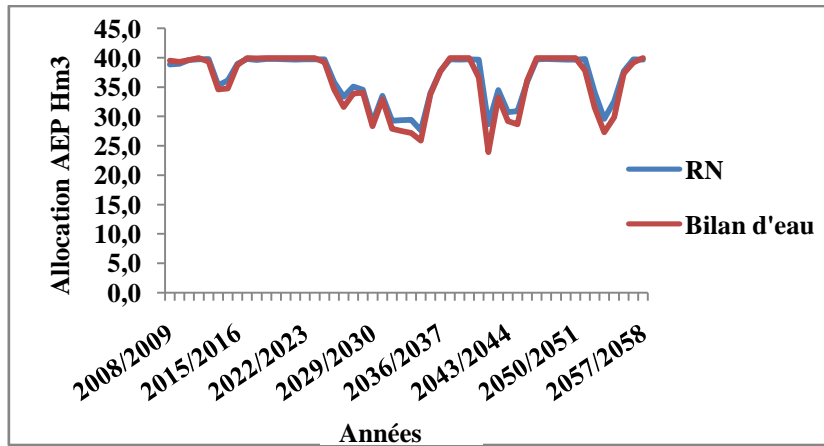


Fig. n° V.18 : Comparaison des allocations de l’AEP par les modèles de répartition : le bilan d’eau et les réseaux de neurones.

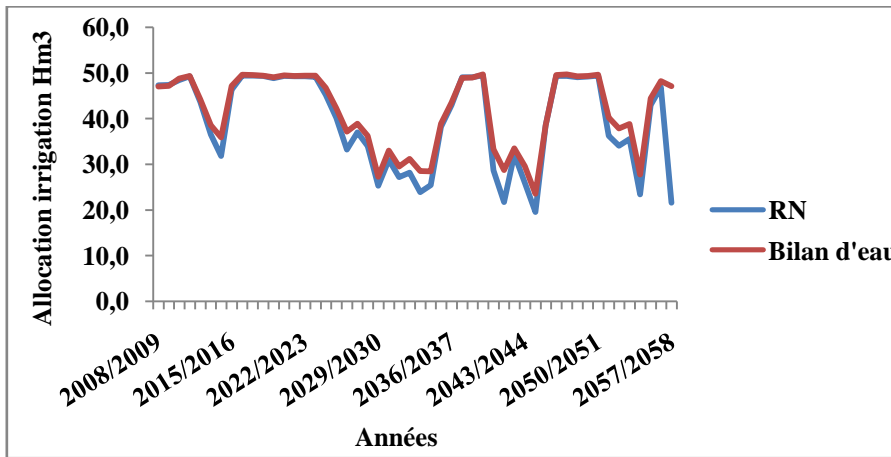


Fig. n° V.19 : Comparaison des allocations de l’Irrigation par les modèles de répartition : par le bilan d’eau et par les réseaux de neurones.

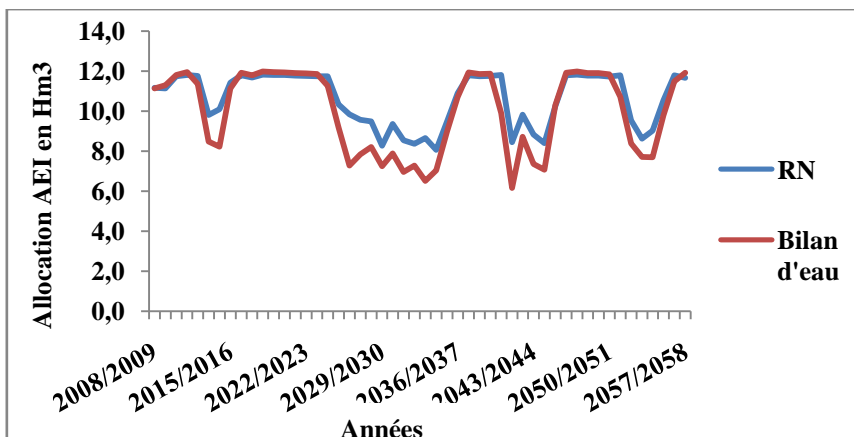


Fig. n° V.20 : Comparaison des allocations de l’AEI par les modèles de répartition par le bilan d’eau et par les Réseaux de neurones.

Pour confirmer que la méthode des réseaux de neurones a bel et bien tenu compte des priorités pour l’attribution des allocations de chaque secteur, nous avons analysé les taux de satisfaction annuels obtenus par les deux méthodes ; ces derniers sont représentés dans les graphes suivants :

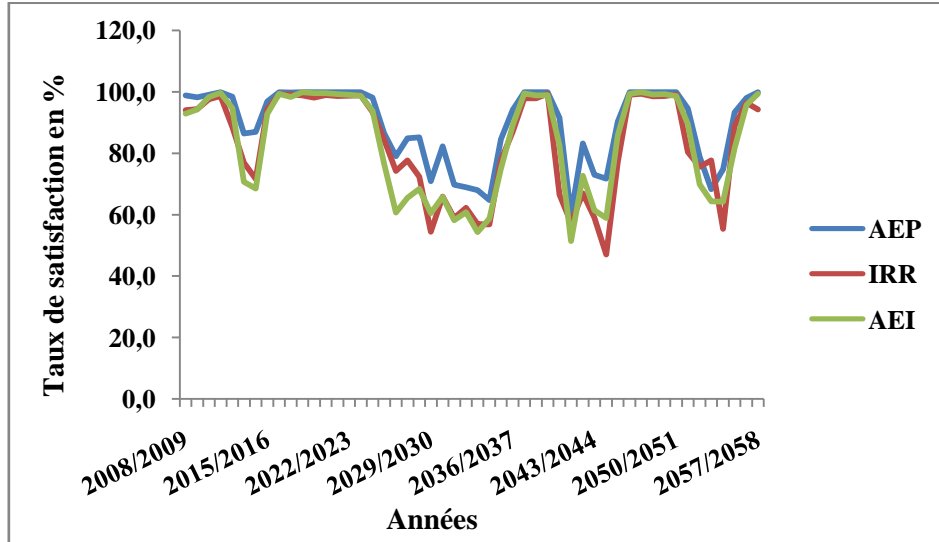


Fig. n° V.21 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de répartition par le bilan d’eau.

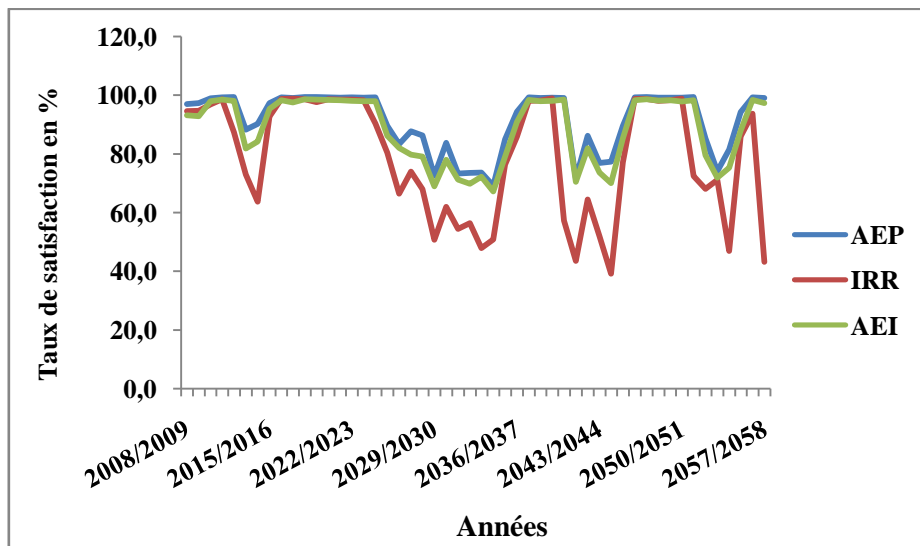


Fig. n° V.22 : Comparaison des taux de satisfactions annuels issus du modèle de répartition par les Réseaux de Neurones.

En comparant les figures VI.21 et VI.22, nous avons remarqué que, pour les deux méthodes, le critère de priorité est généralement respecté. Néanmoins, une nette amélioration

est observée pour la répartition 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.13 : Moyennes des taux de satisfactions annuels des trois secteurs pour les répartitions : par le bilan d'eau et par RN.

	AEP	Irrigation	AEI
Bilan d'eau	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 par le bilan d'eau 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.5. 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.

Le couplage des AG avec les réseaux de neurones est tout à fait concluant, et les résultats s'en trouvent améliorés. Ainsi, la gestion par le bilan d'eau n'est pas toujours à conseiller, même si celle-ci est rationnelle et guidée par la réflexion humaine.

Chapitre VI : Optimisation du plan cultural

VI.1. Introduction

Cette étape de notre travail consiste en une répartition de la superficie consacrée à chaque culture, en utilisant la ressource allouée à l'irrigation. Pour cela, nous avons optimisé un plan cultural pour chaque type d'années ; trois scénarii ont été proposés : un scénario humide, un scénario moyen et un scénario sec. Il s'agit de chercher une répartition culturale tout en ajoutant des contraintes que nous avons imposées dans le programme afin de maximiser le revenu de l'agriculteur et de diminuer la consommation en eau. Pour ce faire, nous avons élaboré un modèle en programmation non linéaire, en utilisant le solveur GAMS et nous avons considéré les cultures les plus représentatives de la région en se basant sur l'état initial du périmètre.

Le but final de cette démarche est d'obtenir un plan cultural optimal tout en respectant le volume alloué à l'irrigation. Cette démarche pourrait contribuer à l'optimisation des plans culturaux sous deux contraintes : eau et superficies disponibles.

VI.2. Présentation du périmètre

Le périmètre de la Bounamoussa représente une des artères principales du développement agricole de la vallée d'El Taref, il couvre une superficie de 16 500 ha répartie en dix secteurs hydrauliques et alimenté en eau à partir du barrage de Cheffia. Il est exploité par des EAC, des EAI et des privés, pour la conduite des cultures maraichères, les arbres fruitiers et les céréales en sec. Il a été dirigé depuis son démarrage en 1968 par la subdivision hydraulique puis il a été confié à l'office des périmètres irrigués d'El Taref depuis 1985 qui assure à ce jour sa gestion et son exploitation.

Le périmètre qui occupe la partie Sud-Est de la plaine de Annaba est rattaché administrativement au deux Willayas : d'Annaba (20%) et d'El Taref (80%) et aux quatre 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. Le périmètre de la Bounamoussa s'étend entre les parallèles 36° 30 et 36° 50 nord et les longitudes 7° 50 et 8° Est. Il appartient à la série des plaines côtières de l'Est Algérien, il est situé de part et d'autre de la route Nationale n°105 reliant Annaba à la daïra de Bouhadjar. 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

Le périmètre d'irrigation de la Bounamoussa a été créé en deux tranches entre 1964 et 1978 :

- ✓ Première tranche : 1200 ha réalisées entre 1964 et 1969 ;
- ✓ Deuxième tranche : 15 300 ha réalisées entre 1970 et 1978.

VI.2.1. Etat initial du périmètre

VI.2.1.1. Structures foncières

Sur les 13 480 hectares du périmètre, 70 % était compris dans le secteur autogéré. Ce secteur est constitué de grands domaines, 64% de ces exploitations avait plus de 500 ha. Notons que c'était des exploitations à vocations multiples (viticulture, agrumiculture, polyculture) et qu'elles bénéficiaient en général de moyens importants.

Pour le secteur privé, la majorité des terres du secteur privé était sous le statut de l'indivision, c'est à dire que le nombre des ayant-droits sur une propriété donnée s'accroît de génération en génération, sans que l'on puisse, procéder à des partages. Cette indivision se traduit du point de vue foncier par des propriétés de dimensions relativement importantes, Le tableau infra, donne la répartition des superficies brutes entre le secteur autogéré d'une part et le secteur privé d'autre part.

Tableau n°VI.1 : Répartition des terres assolées et plantées dans le périmètre de la première phase.

Nature des cultures	Périmètre	
	ha	%
Céréales d'hiver	3 045	26,5
Légumes secs et pommes de terre	817	7,1
Autres cultures annuelles (industrielles, maraîchères, fourragères, etc.)	2 996	26,1
Vignes	2 895	26,2
Agrumes	1 245	11,3
Fruitiers divers	325	2,8
Terres au repos		
	11 325	100,0

Ce tableau indique l'importance des cultures (vigne, arboriculture, cultures industrielles et maraîchères) dans le périmètre de première phase, on remarque aussi la vocation très nette de la plaine d'Annaba pour les cultures industrielles et l'élevage.

VI.2.1.2. Occupation du sol et types d'assolement

VI.2.1.2.1.Secteur socialiste

Dans le périmètre, la répartition des cultures du secteur socialiste est environ la suivante : Comme le montre le tableau suivant d'occupation du sol; les vergers (essentiellement vergers d'agrumes : 1035 ha) sont surtout localisés sur les bourrelets d'oueds, Leur irrigation est assurée, soit à partir de forage, soit à partir de pompage dans les oueds (Seybouse et surtout Bounamoussa). La vigne reste importante malgré arrachages (800 ha).

Tableau n° VI. 2 : L'occupation du sol du Secteur socialiste

Nature des cultures	(1)		(2)	
	ha	%	ha	%
Céréales et leg. Secs	1 800	30	1 740	45
Légumes d'hiver et pommes de terre	481	10	350	7
Fourrage d'hiver	66	1		
Coton	1 393	29	1 095	28
Tomates	405	6	380	10
Légumes d'été	105	2		
Tabac	274	6	200	5
Betteraves à sucre	20			
Maïs grain	214	4	195	5
Maïs et sorgho fourrage	16			
Luzerne	26			
Total des cultures annuelles	4 800	100	3 860	100
Vignes			2 855	
Agrumes			1 035	
Fruitiers			255	
TOTAL			8 005	

(1) Moyennes des plans de culture (1966 et 1967) sur 15 comités de gestion concernés par le périmètre. (2) Valeur retenue pour le périmètre de première phase

La répartition des cultures annuelles est donnée dans le tableau ci-après. Elle résulte des plans de cultures (1965/1966 et 1966/1967) appliqués par les comités de gestion de la plaine, dont 85 % de la superficie est incluse dans le périmètre.

Les cultures d'hiver sont le plus souvent des céréales (blé dur ou tendre); on trouve aussi des légumes secs (petits pois- fèves, pois chiches) et des cultures fourragères (vesce - avoine et bersim). Ces dernières, bien qu'encore réduites, croissent au fur et à mesure de la réinstallation du troupeau bovin et tendent à prendre la place des céréales d'hiver.

Les cultures d'été sont généralement des cultures industrielles (tomate, coton, tabac). On trouve également, mais en moins grandes superficies, des cultures légumières (melons, pastèques, pommes de terre, etc.) ou céréalières (maïs-grain). Dans les zones où l'irrigation est possible, on trouve quelques cultures fourragères d'été (maïs et sorgho fourrager) et de la luzerne.

Les cultures industrielles occupent presque 50 % des terres assolées, dont 29 % pour le coton, 8 % pour la tomate et 6 % pour le tabac qui est en très nette régression. La répartition des terres assolées en (%) pour une superficie de 8005 ha est la suivante :

- ✓ 1290 ha d'arbres fruitiers et agrumes qui représente 16% de la superficie totale irriguée ;
- ✓ 2855 de vignes qui représente 36% de la superficie totale irriguée ;
- ✓ 3860 ha de cultures annuelles ce qui représente 48 % de la superficie totale irriguée

VI.2.1.2.2. Secteur privé

Le tableau infra permis d'établir l'occupation du sol pour ce secteur, il faut noter qu'à l'exception de 210 ha d'agrumes, les cultures pérennes (et notamment la vigne) sont pratiquement inexistantes dans ce secteur.

Les cultures annuelles sont par contre du même type que celles du secteur socialiste, mais l'importance relative des cultures industrielles les unes par rapport aux autres change.

Tableau n°VI.3 : L'occupation du sol du secteur privé

Nature des cultures	Privé Industriel		Privé Familial	
	ha	%	ha	%
Céréales	787	50	713	50
Légumes d'hiver et pommes de terre	157	10	215	15
Coton	79	5		
Tabac	236	15	285	20
Tomates et légumes d'été	313	20	213	15
Total des cultures annuelles	1 572	100	1 426	100
Vignes	40			
Agrumes	210			
Vergers	70			
TOTAL	1 892		1 426	

VI.2.2. Etat actuel du périmètre

Il couvre une superficie totale brute de 16 500 ha dont une superficie nette irrigable de 14 800ha qui sont divisées en dix secteurs hydrauliques, L'irrigation du périmètre est assurée en totalité à partir du barrage Cheffia qui est situé sur l'oued Bounamoussa à 20 km en amont du périmètre.

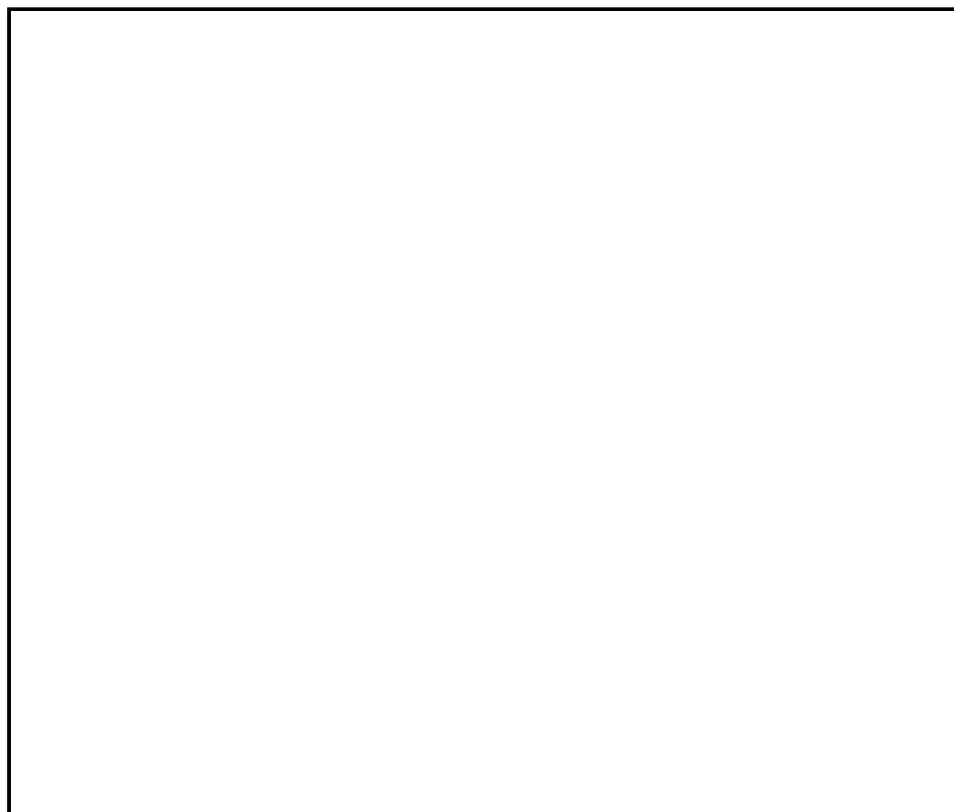


Fig.n°VI.1 : Les secteurs du périmètre Bounamoussa

VI.2.2.1. Ressource en eau

La ressource en eau dans le périmètre est donnée par le tableau suivant :

Tableau n°VI.4 : Le volume théorique moyen affecté à l'irrigation

Nom	Distance au périmètre (km)	Volume régularisé moyen (hm ³ /an) donnée ANBT	Volume théorique moyen affecté à l'irrigation (hm ³ /an)	Salinité de l'eau g/l
Cheffia	20	165	60	0,8

Le volume moyen affecté à l'irrigation est révisée à plusieurs reprises dans l'année et ce en fonction des apports d'eau de pluies au barrage. Actuellement et durant une année normale, le volume alloué à l'ONID varie de 30 à 40 Hm³.

VI.2.2.2. Mise en valeur agricole

Sur une superficie brute équipée de 16 500 Ha, la superficie irrigable initiale du périmètre de la Bounamoussa était de 14 800 ha. Au fil des années cette superficie n'a pas évolué considérablement, en effet une légère diminution de la superficie initiale a été

enregistrée notamment autour des villes de Ben Mhidi, Zérizer, Besbes et Chbaita Mokhtar qui a été causée par l’urbanisation des ilots avoisinants. La superficie totale touchée par l’urbanisation à l’intérieur du périmètre couvre 950 ha environ soit 5,7% de la superficie brute du périmètre. Le récapitulatif des superficies se présente comme suit :

- ✓ Superficie équipée : 16 500 ha ;
- ✓ Superficie irrigable initialement : 14 800 ha ;
- ✓ Superficie urbanisée actuellement : 950 ha ;
- ✓ Superficie irrigable actuellement: 13 850 ha.

VI.2.2.3. Les superficies irriguées

Les superficies réellement irriguées au cours des 45 dernières années (en ha) sont données par la figure suivante :

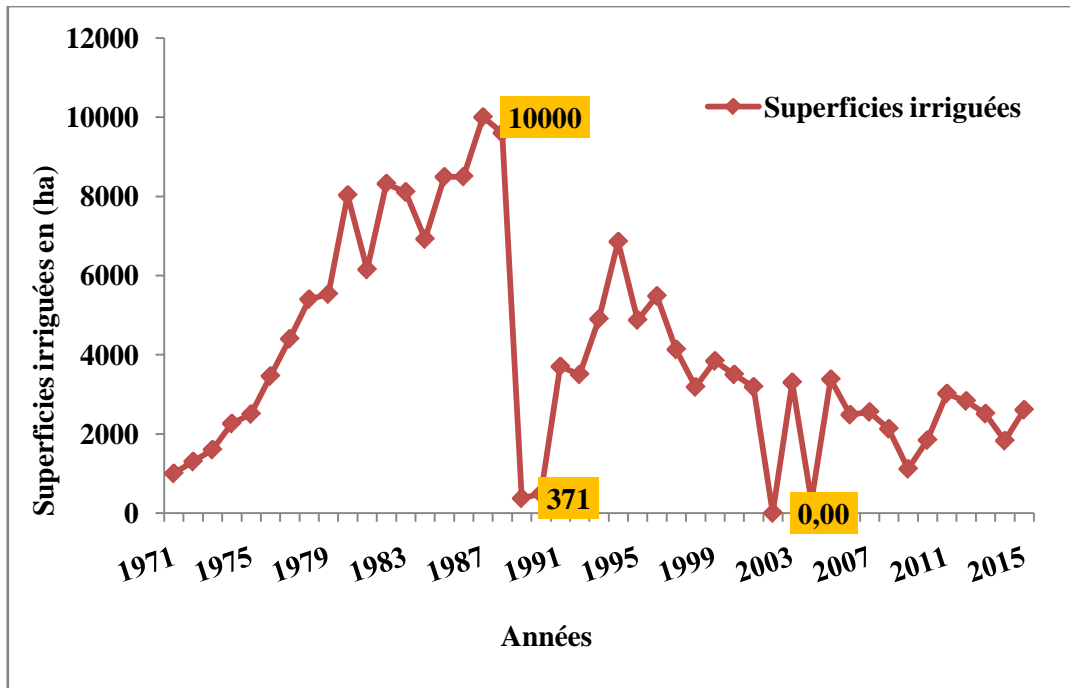


Fig. n°VI.2 : Evolution des superficies irriguées pendant les 40 dernières années.

Comme nous le remarquons, les superficies irriguées dans le périmètre tel qu’enregistrées depuis l’année 1971, montrent une forte irrégularité et des fluctuations assez importantes d’une campagne à une autre. Pendant la première décennie de mise en service du périmètre (les années 1970), la progression de la superficie irriguée a été cohérente car elle a évolué de 1000 ha en 1971 à 8030 ha en 1980. (annexe 5)

Durant les années 1980 le périmètre a fonctionné suivant un régime relativement satisfaisant car la superficie irriguée a dépassé les 70% de la superficie équipée, soit un record inégal depuis 1987. Par rapport aux années 1980 où la moyenne de la superficie irriguée été de 7500 ha, les années 1990 ont enregistré une baisse remarquable au niveau des superficies irriguées car cette moyenne n'été que de 4800 ha. Pour les quatre premières années de la décennie 2000 cette moyenne a chuté fortement et elle n'était que de 1950 ha environ.

VI.2.2.4. Répartition des cultures irriguées

Les orientations générales de la production agricole portaient essentiellement lors de la réalisation du périmètre sur :

- 1- La reconversion du vignoble (arrachage de la vigne)
- 2- Les systèmes de polyculture élevage en partant d'une gamme de production techniquement accessibles, choisies conformément aux critères et aux options économiques.
 - ✓ arboriculture (agrumes) ;
 - ✓ des cultures industrielles (coton, tomate, tabac, betterave et éventuellement tournesol et soja.) ;
 - ✓ des cultures maraichères de plein champ ;
 - ✓ des cultures fourragères en vue de la production du lait et de la viande ;
 - ✓ des cultures céréalières d'été et d'hiver.

L'élevage a lui aussi un développement remarquable avec la mise en valeur du périmètre de Bounamoussa. La moyenne des effectifs en vaches laitières installées était de 2600 à 3000 avec une production globale de 7.000.000 de litres de lait par an. Malheureusement, la sécheresse qui a sévi durant les années 1988 à 1992 a influé négativement sur la production animale d'où la régression de l'élevage laitier au niveau des exploitations et l'apparition de divers problèmes techniques tels que :

- ❖ l'épuisement des stocks en fourrages
- ❖ l'absence de surfaces fourragères irriguées
- ❖ manque d'entretien du cheptel ayant entraîné un état sanitaire précaire et a engendré des mortalités importantes.

Cette situation a été accentuée après la réorganisation des DAS induisant de ce fait, la vente du cheptel et l'abandon de l'élevage bovin laitier.

La figure suivante illustre l'occupation actuelle du périmètre par les différentes cultures (annuelles et pérennes).

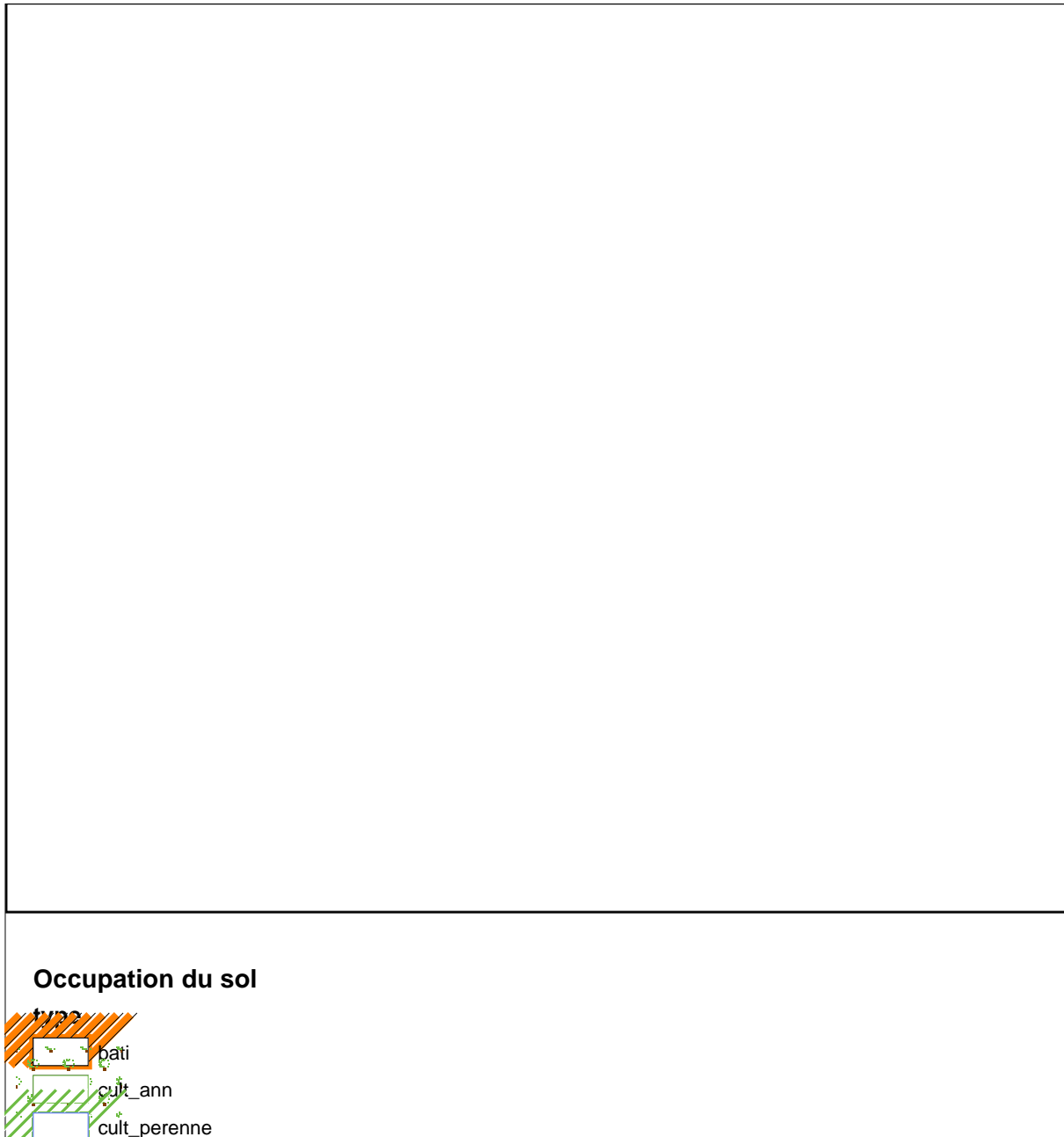


Fig. n°VI.3 : L'occupation actuelle du périmètre

Cependant depuis 1989 à ce jour, les irrigations ont sensiblement régressées. Cette situation a favorisé la conduite des cultures en sec notamment avec l'apparition des céréales qui prennent des proportions importantes dans le périmètre et l'apparition de jachère.

Tableau n°VI.5 : La répartition actuelle des cultures au niveau du périmètre irrigué.

Culture	S.I .2003	%	S.I. 2010	%	S.I.2015	%
Arboriculture (agrume+AF)	800	5,5	499,5	23,56	607,74	25,48
Arboriculture(agr+AF)***	700	4,7				
Cultures maraichères	1200	8,1	1230,75	58,05	750,16	31,45
Cultures industrielles	1300	8,8	376,75	17,77	1013,02	42,47
Cultures fourragères	50	0,4	13	0,61	14,55	0,61
Céréales + jachère	10 750	72	00	00		
Total	14 800	100	2120,00	100	2385,47	100

*** plantations situées le long des oueds de Seybouse et de Bounamoussa, non souscrites et irriguées directement moyennant un pompage à partir des oueds

VI.2.2.5. Besoin et ressources en eau du périmètre

Les besoins en eau d'irrigation adoptés lors des études de création du périmètre de la Bounamoussa à la fin des années 60 ont été basés sur les données de l'évapotranspiration, de la pluviométrie et du système cultural projeté. Le débit fictif retenu était par conséquent 0,7l/s/ha, les besoins définitifs en en eau pour l'irrigation des dix secteurs totalisent 10 800l/s.

La satisfaction des besoins en eau du périmètre est assurée par le barrage de la Cheffia, d'une capacité de 165Hm³ avec un volume régularisable annuel moyen de 95Hm³, la réparation initiale des eaux du barrage arrêté lors de la conception des études était de 60Hm³/an pour l'irrigation du périmètre et 35Hm³/an destinés à l'alimentation en eau potable et industrielle de la ville de Annaba.

Au fil des années, le volume alloué au périmètre n'a jamais atteint les 60Hm³/an et il a subit des variations très importantes qui ont été engendrées par le régime des pluies et par la priorité accordée à la satisfaction des besoins en eau de la ville de Annaba. Il est à signaler que l'affectation de l'eau d'irrigation à O.N.I.D. d'El Taref à partir du barrage de la Cheffia est décidée au niveau d'une commission ministérielle qui met en priorité les besoins en eau potable de la ville d'Annaba et en fonction du volume disponible.

Cette affectation est révisée à plusieurs reprises dans l'année et ce en fonction des apports d'eau de pluies au barrage. Durant une année normale, le volume alloué à l'Office du

périmètre d'irrigation O.N.I.D. varie de 30 à 40 Hm³. L'eau affectée annuellement au périmètre est acheminée soit par le biais de la conduite principale et des deux piquages. Asfour et Zerizer, soit par les lâchures d'eau qui se font directement dans l'oued de Bounamoussa pour l'alimentation de la station de pompage à l'aval. La figure suivante, montre les volumes d'eau réellement affectés au périmètre durant les 30 dernières années (en million de m³). (annexe 6)

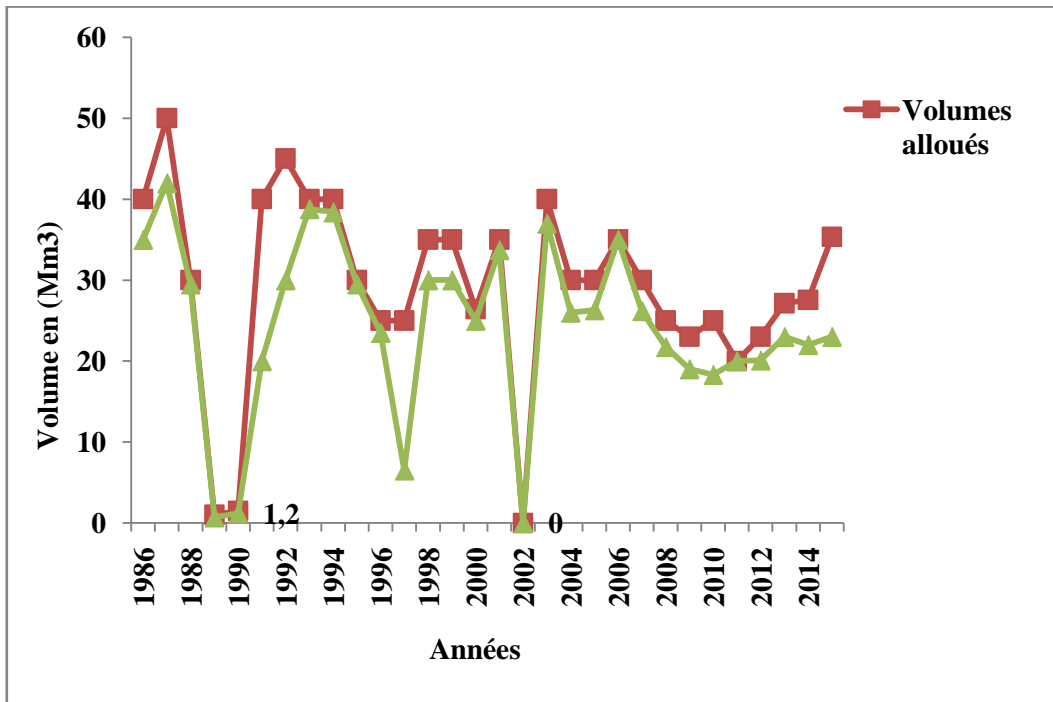


Figure n° VI.4 : Evolution de la consommation en eau du périmètre

Le diagnostic des ressources en eau mené sur site et l'évolution des superficies irriguées, montre nettement que les services d'exploitation n'ont jamais consommé la totalité de volume alloué et le volume théorique fixé à 60 Hm³ n'a jamais été sollicité, ce qui montre que la disponibilité de l'eau d'irrigation n'est pas une contrainte à l'exploitation optimale de la totalité de la superficie équipée du périmètre.

VI.2.2.6. Climatologie

Le climat de la plaine d'El Taref est caractérisé d'une façon générale par deux saisons : une saison sèche et chaude avec de très faibles précipitations qui s'étend d'Avril à Octobre et une saison douce et pluvieuse qui s'étend de Novembre à Mars marquée par de fortes averses et de rares gelées. La pluviométrie annuelle moyenne est de 800 mm, mais elle

enregistre des variations importantes d'une année à l'autre et les années sèches deviennent de plus en plus fréquentes.

La saison sèche qui s'étend en moyenne sur sept mois, enregistre les températures assez élevées en Juillet – Août dont les maxima journaliers atteignent fréquemment les 45°C quant aux températures moyennes mensuelles elles varient de 10°C en Janvier à 28°C en Août.

VI.2.2.7. Typologies des exploitations et variation agricole du périmètre

Au démarrage de l'exploitation du périmètre la majorité des terres été réparties en îlots au sein des domaines agricoles socialistes (D.A.S) ; au total la superficie du périmètre était répartie à raison de 80% en domaines socialistes autogérés (D.A.S.) (62 domaines) et 20% pour les privés.

En 1987 et à l'issue de la restriction des D.A.S et en application de la loi 87-19 du Novembre 1987, la structure foncière du périmètre a été modifiée, ainsi le nombre d'exploitation a considérablement augmenté et la taille des exploitations a très sensiblement diminué. L'état parcellaire du périmètre qui été auparavant constitué de D.A.S et de terre privées uniquement s'est transformé après la structuration en cinq types d'exploitation comme suit :

- ✓ Exploitations agricoles individuelles (EAI) : 65.
- ✓ Exploitations agricoles collectives (EAC) : 623.
- ✓ Terre privées : 900 propriétaires privés.
- ✓ Fermes pilotes : 40.
- ✓ Structures de l'Etat (institut de recherche, institut du développement végétal, champ d'exploitation).

VI.2.2.8. Vocation agricole du périmètre

Sur la base des conclusions des études agro-pédagogiques réalisées à la fin des données 1960, le périmètre a été décomposé en trois zones :

- ✓ Zone 1 (6250 ha) : comprend les meilleurs terres du périmètre qui sont caractérisées par des sols à texture grossière qui conviennent à toutes les cultures et notamment à l'agrumiculture. Ils sont concentrés le long des rives des oueds Seybouse et Bounamoussa et sont bien drainés ;
- ✓ Zone 2 (3650 ha) : comprend les sols avec texture fine favorables aux cultures maraîchères, fourragères et céréalières, mais leurs aptitudes culurales dépendent de la qualité de fonctionnement du réseau d'assainissement ;

- ✓ Zone 3 (6400 ha) : occupe la partie basse de la plaine et caractérisée par une texture très fine et argileuse qui nécessite un assainissement superficiel efficace pour lutter contre la remontée de la nappe et la stagnation des eaux de pluie.

Pour valoriser ces terres, l'étude initiale a suggéré un plan cultural de mise en valeur diversifié qui a été pratiqué durant les deux premières décennies puis modifié progressivement à partir de la fin des années 1980 et notamment après la restructuration foncière des D.A.S en 1987, par rapport à la vocation agricole initiale qui a été destinée à la viande rouge et le lait.

VI.2.2.9. Distribution de l'eau et mode d'irrigation au niveau du périmètre

La conception du réseau d'irrigation a été faite sur la base d'un système de conduite sous pression qui est commandé à l'aval au niveau de la borne d'irrigation moyennant un système d'irrigation à la demande qui couvre la totalité des secteur hydraulique. La pression résiduelle au niveau de la borne qui a été adoptée à l'époque était de 4 à 5 bars qui sont jugée nécessaire pour le fonctionnement des asperseurs et des rampes mobiles étant donné que le système préconisé au départ était l'irrigation par aspersion. Les exploitants ont été dotés de matériel et d'équipement à la parcelle suffisants pour couvrir les besoin en irrigation de toutes les cultures au niveau de chaque ilot.

Après la restriction du périmètre et la nouvelle distribution des terres, le schéma d'irrigation initial conçu par l'étude et les équipements à la parcelle sont devenus non adaptés à la nouvelle structure foncière vu l'augmentation très importante du nombre d'exploitation et le partage de la propriété qui ne cesse de changer et de croître à cause de l'évolution démographique au niveau des ayants droits à l'exploitation des terres. Ce phénomène a eu un effet direct sur la gestion des équipements à la parcelle qui ne pourront satisfaire toutes les exploitations à l'aval de chaque borne d'irrigation ceci sans compter leurs états de dégradation assez avancé.

Cette situation a engendré beaucoup d'abandon des terres et a poussé le peu d'irrigants qui restent à adopter le système d'irrigation gravitaire simple et par submersion à l'intérieur des parcelles, ce qui engendre une perte d'eau très importante. La pratique de l'irrigation localisée (goutte à goutte) est constatée dans plusieurs secteurs notamment pour l'arboriculture et les cultures maraichères.

La distribution de l'eau d'irrigation pratiquée aujourd'hui par l'ONID, est basée sur les superficies déclarées par les exploitants au démarrage de la campagne agricole en mars et en juillet pour les cultures d'arrière saison. L'ONID établit un contrat de fourniture d'eau

d'irrigation avec les agriculteurs souscris qui ne sera validé qu'après le paiement de l'avance sur la consommation d'eau et l'engagement de chaque irrigant sur l'échelonnement des paiements du montant restant. Les montants des contrats sont arrêtés par l'ONID sur la base des superficies souscrites et des cultures déclarées, le volume d'eau à fournir est défini moyennant des taux à l'hectare pratiqué par l'ONID en fonction des besoins en eau de chaque culture (de 4000 à 7000 m³/ha).

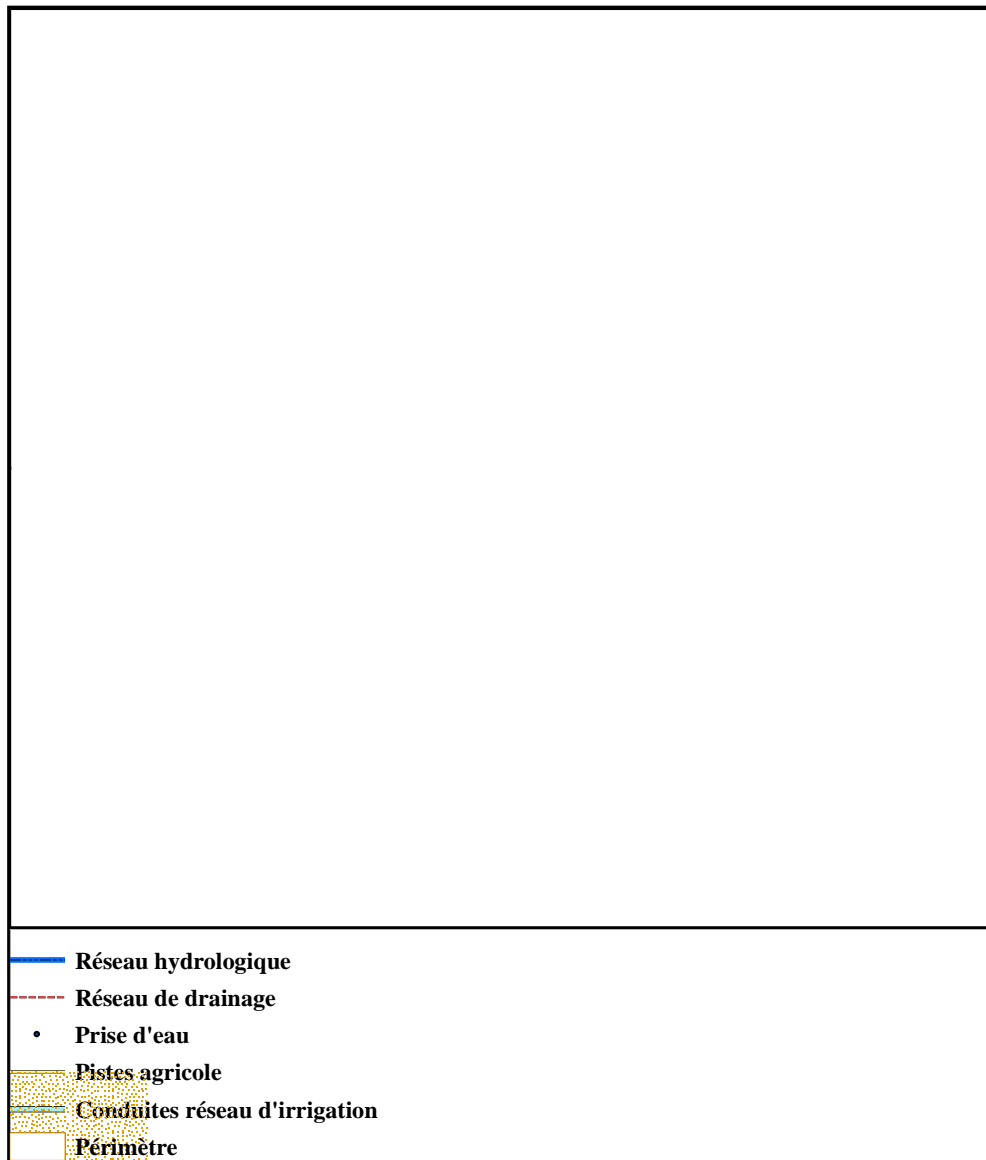


Fig.n°VI.5 : Le réseau d'irrigation dans le périmètre Bounamoussa.

VI.2.2.10. La situation actuelle du périmètre de Bounamoussa :

L'analyse de la situation actuelle du périmètre de Bounamoussa et le diagnostic de ses infrastructures hydrauliques ont fait ressortir des défaillances multiples dans la mise en valeur du périmètre et dans la qualité du service rendu par l'ONID aux irrigants, à savoir :

- ✓ L'état très vétuste des équipements hydrauliques au niveau des ouvrages de distribution et la protection de réseau d'irrigation : en effet, les ouvrages sont dans un état d'abandon quasi-total, la plupart des pièces de contrôle de débit et de pression installées initialement ont complètement disparues et le branchement des irrigants sur les bornes se fait généralement d'une façon artisanale et par les moyens propres des irrigants. Le génie civil des ouvrages et aussi vandalisé et tous les systèmes de fermetures ont été arrachés. sur un total de 2000 ouvrages expertisés, on dénombre plus de 90% qui nécessitent d'être rénovés et/ou remplacés entièrement ;
- ✓ La régression continue de la superficie irriguée : malgré l'abondance de l'eau d'irrigation affectée annuellement au périmètre et disponible au niveau du barrage de la cheffia, la superficie irriguée connaît depuis quelques années un recul très alarmant étant donné qu'elle n'a pas dépassé les 3000 ha depuis l'année 2000 sur une superficie irrigable nette de 14000 ha environ. En contre partie, la superficie occupée par les céréales en sec ou laissée en jachère ne cesse d'augmenter, elles se situent actuellement à 72% de la superficie irrigable (campagne 2003/2004).
- ✓ L'état de dégradation avancée des conduites d'irrigation en acier : le réseau d'irrigation en acier situé en majorité dans les trois secteurs de B.N.O , B.Z. et asfour subit depuis plusieurs années des casses très fréquentes dues à son état de corrosion profonde, ce qui a engendré des fuites d'eau considérables et a perturbé le fonctionnement du réseau. L'ONID a déjà engagé un programme de remplacement de ces conduites qui a démarré depuis mai 2004. La lenteur de la cadence de ces travaux et la désorganisation des équipes d'entrepreneurs sur place pose actuellement de sérieux problèmes aux exploitants étant donné que les secteurs concernés sont privés d'eau à cause de ces travaux de rénovation ;
- ✓ La dégradation de réseau d'assainissement et de pistes agricoles : l'absence du curage des fossés d'assainissement principaux et secondaires a favorisé la remontée des eaux dans ces fossés qui a entraîné l'effondrement des berges et a bouché les buses de traversée. A cela s'ajoute la disparition quasi-totale des fossés de drainage qui longent les pistes, qui ont été conçus pour évacuer les eaux excédentaires de pluie, et qui sont aujourd'hui complètement ensablés et envahis par les mauvaises herbes ; ceci sans compter les affaissements constatés au niveau des croisements entre les pistes et les fossés d'assainissements et les déformations de l'état de surface des chaussées ;
- ✓ Les faibles moyens humains et matériels de L'ONID d'el Tarf : le parc auto de l'office n'a pas été rénové depuis sa mise en service en 1987. Cette situation a mis les

véhicules de transport des ouvriers et les engins de travaux hors tout usage et dans un état de délabrement général. Le faible effectif en personnel de terrain affecté au périmètre est aussi un handicap de taille, en effet seuls trois aiguadiers sont chargés du suivi du réseau d'irrigation pour une superficie équipée de 16 500 ha, soit trois fois moins que les normes en vigueur ;

- ✓ L'absence de toute approche participative des irrigants dans la gestion et la mise en valeur du périmètre : malgré l'existence d'une association représentative des irrigants, il ressort clairement l'absence de toute forme de collaboration avec l'ONID dans la gestion quotidienne des problèmes liée à la distribution de l'eau et la maintenance du réseau. L'absence de communication entre les deux acteurs principaux de la mise en valeur du périmètre a entraîné un climat de prudence et sans confiance mutuelle ;
- ✓ Les difficultés financière de l'ONID l'état vétuste du réseau, le faible taux annuel d'irrigation et la tarification de l'eau vendue à l'irrigant sont les principaux obstacles rencontrés par l'office pour garantir un taux de recouvrement satisfaisant. Pour remédier à cette situation et assurer des recettes garantissant au moins la rémunération de son personnel, l'office fournit aujourd'hui des prestations de travaux pour des tiers dans les communes avoisinantes en dehors du périmètre pour des taches qui n'ont aucun lien avec sa mise en valeur.

VI.3. Revue bibliographique sur l'optimisation des plans cultureux

Dans beaucoup de pays, l'approvisionnement en eau disponible est limité et/ou coûteux, pour irriguer toutes les superficies irrigables. Dans les périmètres irrigués, les agriculteurs doivent décider ou bien d'irriguer entièrement un petit secteur pour avoir une production maximale ou alors réduire la dotation en eau appliquée par hectare pour augmenter la superficie irriguée (Haouari et al. 2001). Ainsi, la nécessité d'avoir un plan cultural économiquement viable, nous oblige à utiliser des modèles d'optimisation ; ces derniers ont été traités par plusieurs auteurs.

Sheng (2003) qualifie le modèle d'optimisation comme étant un outil très efficace pour aider le gestionnaire à prendre des décisions éclairées avant chaque campagne d'irrigation, au niveau d'un périmètre d'irrigation, l'objectif de ces modèles est d'obtenir un niveau élevé d'efficacité de l'irrigation et une utilisation rationnelle de la ressource en eau et par conséquent des niveaux de rendement élevés.

Les techniques d'optimisation, notamment par la programmation linéaire et non linéaire, ont été mises en œuvre pour rechercher des solutions pour un assolement (Leroy,

1989) et pour la stratégie d'irrigation sur l'exploitation (Leroy *et al.*, 1993). C'est ce que font par exemple Benoît *et al.* (2001) et Leenhardt *et al.* (2005) en utilisant des probabilités de transition d'une culture à une autre. Ces probabilités sont construites à partir des assolements successifs observés dans le passé.

Bogachan *et al.* (2003) ont développé deux modèles d'optimisation (non linéaire et linéaire) pour la détermination de la répartition optimale des cultures, de la quantité d'eau d'irrigation et du revenu maximum dans des conditions d'approvisionnement d'eau limitées. L'examen des résultats des deux modèles ont montré que le modèle non linéaire a donné les valeurs les plus élevées du revenu agricole. Mainuddin *et al.* (1997) ont formulé un modèle linéaire pour obtenir un plan cultural optimal. Pour résoudre le problème, ils ont utilisé le solveur LINDO.

Amir et Fisher (1999) ont employé un modèle linéaire pour analyser la production agricole. Reza *et al.* (2001) ont développé une fonction objective non linéaire pour optimiser le plan cultural et l'attribution de l'eau. Kumar *et al.* (1998) ont formulé un problème de programmation non linéaire pour identifier un modèle optimal de répartition culturale ainsi qu'un programme optimal d'irrigation. Carvallo *et al.* (1998) ont développé un modèle d'optimisation non linéaire pour la détermination des optimaux de cultures. Ils ont employé le logiciel Gams-minos pour résoudre le problème. Selon Boustani *et al.* (2010), La détermination du modèle optimal de culture est essentielle pour les régions arides et semi-arides, ils ont appliqué l'approche de programmation multi-objective afin de réduire l'utilisation de consommation de l'eau.

JANOVA (2014) a développé un modèle de prise de décision pour la planification de la production agricole en République tchèque. Ce modèle intègre à la fois deux contraintes : la première contrainte est le caractère aléatoire des paramètres d'entrées et la deuxième contrainte est les exigences en matière de succession des cultures. Les résultats de ce modèle peuvent être utilisés par l'agriculteur comme une véritable information pour la prise de décision, lui permettant ainsi de corriger ou d'améliorer le plan cultural de son exploitation dans l'objectif de maximiser le profit.

Un modèle de programmation linéaire a été formulé par Kaur *et al.* (2010). Ces auteurs ont suggéré un plan cultural optimal pour maximiser le revenu net de l'agriculture du Punjab et en utilisant d'une manière rationnelle les eaux souterraines du Pendjab. Haddad *et al.* (2009) ont développé un modèle de programmation linéaire pour optimiser les assolements annuels dans des secteurs de polyculture irriguée par un réservoir. L'objectif est de maximiser le bénéfice annuel du système par l'assolement et les dotations d'eau mensuelles. L'étude de

Otieno et al. (2011) présente un modèle multi-objectif de la répartition culturelle d'un périmètre irrigué. Ce modèle a été utilisé afin de maximiser le rendement et minimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation.

Raghava et al. (2012) ont essayé d'expliquer par la présente étude qu'une bonne gestion des sols et des eaux est la clef pour avoir une bonne production agricole. Ces mêmes auteurs ont développé un modèle multi-objectif afin de maximiser le revenu net et réduire au minimum l'utilisation de l'eau d'irrigation. Le problème a été résolu par la technique de la programmation non linéaire. Otoo et al. (2015) ont formulé un modèle linéaire pour optimiser le plan cultural de 16 exploitations agricoles dans la zone de Fanteakwa dans la région orientale du Ghana. La comparaison des résultats obtenus entre le plan cultural existant et le plan cultural optimisé par le modèle indiquent que le modèle a apporté des améliorations significatives.

VI.4. Problématique et méthodologie de travail

VI.4.1. Problématique du périmètre

Dans un contexte où la ressource est peu valorisée, l'agriculture du périmètre Bounamoussa se présente comme être principalement tournée vers des cultures peu diversifiées et menées en régimes pluviaux. Ces systèmes de cultures ne permettent pas de répondre à des enjeux essentiels tels que la participation à la souveraineté alimentaire locale et nationale et à la stabilisation du revenu des agriculteurs.

Le périmètre irrigué de Bounamoussa fait partie de la grande plaine de la vallée de Seybouse. Il a bénéficié d'investissements importants en matière d'aménagement Hydro-Agricole. Cependant, les résultats réalisés au niveau de la production agricole sont loin d'être satisfaisants, comparativement aux potentialités de la zone. Les niveaux de rendements sont en dessous de ceux prévus par les études de faisabilité.

Le taux d'intensification cultural, définit comme étant le rapport de la superficie totale cultivée au cours de la campagne sur la superficie totale équipée, demeure très faible. Ce taux n'a guère dépassé les 50% durant les 14 dernières années. Cette situation a révélé une sous-utilisation des équipements mis en place.

Partant de ces faits, et dans l'objectif de modéliser ce périmètre, deux étapes de travail ont été effectuées. Une première étape qui consiste en la rencontre avec les différents gestionnaires concernés par l'eau agricole et le statut foncier ; quelques objectifs ont été fixés, pour le périmètre de la Bounamoussa, par ces gestionnaires et qui ne sont pas atteints jusqu'à ce jour, parmi ces objectifs :

- ✓ Accroître la superficie irriguée de 2000 ha à 8000 ha ou plus (sachant que la superficie irrigable est de 13800 ha) ;
- ✓ Revenir à la vocation initiale de la région en terme de :
 - *Cultures* : Tomate industrielle, fourrages (à condition d’avoir une irrigation de complément), et arboriculture fruitière. 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, et donc revenir à la notion d’îlots, avec une borne sur 20 ha, est indispensable.

La deuxième étape, consiste à créer un modèle, ce dernier est basé sur le principe d’optimisation en programmation non linéaire (NPL) .De ce fait, le modèle développé dans le cadre de cette thèse ne sera qu’une simple contribution dans l’approche d’optimisation du plan cultural, et l’utilisation de l’eau dans le périmètre Bounamoussa. Aussi, ce travail se propose de réaliser une réflexion sur les changements des systèmes de cultures souhaitables dans la zone d’étude pour mieux valoriser la ressource présente.

VI.4.2. Méthodologie de travail

La démarche qui a été utilisée implique une modélisation du plan cultural. Il s’agira d’une part, de modéliser les besoins en eau des cultures via un modèle agro-climatique, et d’une autre part, de modéliser le plan cultural via un modèle bio-économique, qui a été implémenté par les données relatives à 33 cultures à savoir : les consommations en eau, les coefficients de stress, les rendements et les prix des différentes cultures. Nous avons déterminé ces surfaces optimales sans considérer d’autres ressources en eau éventuellement utilisables.

La sélection des cultures a été faite de la façon suivante :

- Cultures actuellement pratiquées dans le périmètre ;
- Cultures à développer : cultures initialement pratiquées (en se référant à l’état initial du périmètre) mais actuellement sont devenues minoritaires ou absentes et dont le développement a été jugé faisable. Les cultures sur lesquelles a été axée la modélisation sont données en annexe 7.

VI.4.2.1 Détermination des besoins en eau : modèle agro-climatique

La détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant, aussi bien la plante elle-même, que les données climatiques ou pédologiques de la région. Les besoins en eau sont ainsi calculés pour chaque culture et pour les trois types d'année, au moyen du logiciel CROPWAT en y introduisant les paramètres climatiques et cultureux.

Le modèle CROPWAT a été utilisé pour quantifier les relations entre le climat et les cultures considérées, par le biais du calcul des besoins en irrigation à l'échelle de la culture. Ce modèle a également été utilisé pour quantifier la variation du rendement des cultures considérées en fonction d'un certain niveau du stress hydrique. Ce modèle a été choisi car il est plus facile à utiliser par rapport à d'autres modèles. Les besoins en eau sont exprimés en m³/ha.

VI.4.2.1.1. Détermination des années types

Afin de choisir les années types, nous avons considéré la pluviométrie annuelle dans une série de 30 ans (1981 – 2010) de la station de la Cheffia . Parmi les valeurs de cette série, nous avons sélectionné trois différents scénarii :

- ✓ Une année moyenne : celle dans la pluviométrie annuelle s'approche le plus de la médiane de la série de 30 ans ;
- ✓ Une année sèche : celle avec la déviation par rapport à la médiane la plus basse, après avoir écarté les deux valeurs extrêmes (la plus basse et la plus élevée) ;
- ✓ Une année humide : celle avec la déviation par rapport à la médiane la plus élevée après avoir écarté les valeurs extrêmes.

VI.4.2.1.2. Calcul des besoins en eau pour les trois types d'année

Dans la pratique, et puisque c'est impossible de savoir à l'avance quel sera le type d'année climatique, les besoins en eau ont été établis pour les trois types d'années : année sèche, année moyennement pluvieuse et année humide (AS, AM et AH respectivement). Aussi, nous avons jugé utile de déterminer le plan cultural pour ces trois types d'années, et la prise de décision sur l'assolement a été faite en considérant ces années.

VI.4.2.2. Modélisation du plan cultural : modélisation bio-économique

Dans cette étude, un modèle bio-économique a été développé afin de proposer une répartition culturelle optimale pour le périmètre Bounamoussa. Le modèle développé est un

modèle statique, d'un horizon temporel de 1 an ; optimisant une fonction objectif afin de déterminer quelle décision sera prise en termes de choix de systèmes de cultures.

Ce modèle de programmation non-linéaire a été écrit en langage GAMS (The General Algebraic Modeling System) avec le solveur CONOPT. Les inputs de ce modèle proviennent à la fois : des rendements, des prix des produits des cultures et des résultats du modèle agro-climatique pour les besoins en eau et la réponse du rendement au stress hydrique.

La formulation mathématique de la fonction objectif a été faite comme suit :

$$R = \sum_p C(p) * S(p) * Y(p) * \prod_t [Wr(p, t)/Wd(p, t)]^{l(p,t)}$$

Sous contraintes :

1. Contrainte superficie : La somme des superficies allouées par le modèle aux différentes cultures ne doit pas dépasser la superficie disponible totale. L'écriture mathématique de cette contrainte se fait comme suit :

$$\sum_p S(p) \leq S_0$$

2. Contrainte eau : La somme des consommations en eau des différentes cultures retenues ne doit pas dépasser la ressource hydrique disponible totale. L'écriture mathématique de cette contrainte se fait comme suit :

$$\sum_p Wr(p, t) \leq W_0(t)$$

Avec :

P : Types de cultures disponibles;

t : Période de modélisation (une année, en utilisant un pas de temps d'un mois);

S(p) : Superficie à allouer à chaque culture;

S₀ : La superficie totale à ne pas dépasser ;

l(p,t) : Coefficient de stress pour chaque culture et pour chaque mois indiquant la baisse de rendement;

Wr(p,t) : La dotation en eau en m³/ha;

Wd (t) : La demande en eau d'irrigation pour chaque culture et pour chaque mois;

W_0 : L'eau disponible totale à allouer pour le périmètre;

$C(p)$: Prix de chaque culture;

$Y(p)$: Rendement pour chaque culture.

Ce modèle maximise la fonction objectif (revenu espéré de l'agriculteur) afin de représenter son choix de systèmes de cultures en fonction des années climatiques. Cette optimisation se fait sous deux contraintes : l'eau d'irrigation et la superficie à irriguer disponibles totales au niveau du périmètre. Les résultats sont représentés en annexe 8,9 et 10.

VI.5. Proposition du plan cultural optimal pour chaque type d'année

L'évaluation du modèle utilisé dans le cadre de la présente étude, repose principalement sur deux points fondamentaux : l'évaluation des sorties du modèle et l'évaluation de la logique des sorties du modèle ; cette logique est en rapport avec la réalité du terrain.

Les assolements optima donnés par le modèle et les résultats obtenus pour chaque type d'année climatique sont représentés dans le tableau VI.7. Les assolements proposés ont aussi donné les consommations en eau et le revenu brut des différentes cultures du périmètre (tableau VI.8).

Tableau VI.6. Les plans cultureux optimaux pour les différents types d'années (AH,AM,AS)

Cultures	Superficies optimisées		
	Année humide (AH)	Année moyenne (AM)	Année sèche (AS)
Céréales et légumes Secs			
Blé dur	1200	1200	0
Pois chiche	1000	583	303.7
Fèves	0	416.58	196.3
Total	2200	2199.58	500
Fourrages			
Vesce avoine	1422.27	1136.8	701.1
Luzerne	277.9	239.52	0
Sorgho	0	313.89	0
Mais grain	299.83	309.79	219.15
Total	2000	2000	920.15
Maraichages			
Tomate industrielle	1218.92	899.1	0
Poivron	0	0	17.19
Pomme de terre AS	781.08	870.69	599.14
Pomme de terre S	246.26	443.09	0
Courgette	1069.71	1097.95	0
Aubergines	484.03	258.96	64.58
Carotte	0	0	168.13
Oignon sec	0	0	263.82
Oignon frais	0	0	503.46
Pastèque	0	230.21	183.62
Total	3800	3800	1799.94
Total des cultures annuelles	8000	7999.58	3220.19
Vignes	1566.84	1566.84	1566.84
Agrumes	272.73	272.73	272.73
A.Fruitiers	356.14	356.14	356.14
Total périmètre	10195.71	10195,29	5415,9

Tableau VI.7. Les consommations en eau et les revenus bruts pour les différents types d'années climatiques (AH, AM, AS)

Cultures	Année humide (AH)		Année moyenne (AM)		Année sèche (AS)	
	Consom eau (Mm ³)	Revenu (M.Da)	Consom eau (Mm ³)	Revenu (M.Da)	Consom eau (Mm ³)	Revenu (M.Da)
Céréales et légumes secs	5.094.200,00	792.109.965	6.140.605,98	345.300.646,81	1.820.900,4	59.276.782
C. Maraichères	14.307.087,33	11.940.000.000	14.700.521,48	11.250.781.000	5.992.079,47	1.061.497.344,6
C. Fourragères	4.556.331,959	167.437.660,49	7.697.753,096	147.526.566,32	4.019.612,46	45.650.804
Arboricultures et vigne	6.334.355,044	1.930.000.000	11.370.816,94	1.930.000.000	14.694.850,5	1.930.000.000
Total	30.291.974,3	14.829.547.625	39.063.623,5	13.673.608.213	26.527.442,8	3.096.424.930,6

En analysant le tableau des plans culturaux proposés, nous avons remarqué que la répartition des types de cultures composant l'occupation du sol du périmètre Bounamoussa, au sein du modèle, montre la présence d'un système polyculture (céréales, légumes secs, fourrages et maraichages), l'arboriculture fruitière (agrumes et arbres fruitiers) et la vigne. Sur les 33 cultures existantes, 22 parmi elles ont été choisies par le modèle.

Cette répartition montre en général une très forte présence des cultures maraichères à savoir la tomate industrielle, la pomme de terre AS et S, la courgette et l'aubergine ; cela pour les deux années climatiques humide et moyenne. Par contre en année sèche, ces mêmes cultures n'ont pas été proposé par le modèle ou leurs superficies sont faibles. Toute fois, cette répartition des cultures optimale n'est pas sans conséquences sur la consommation en eau dans la mesure où les besoins en eau de ces cultures sont élevés.

Compte tenu de la superficie consacrée à chaque culture dans le plan cultural proposé par le modèle présenté dans le tableau VI.6 et pour chaque type d'année climatique, nous avons constaté du point de vue des superficies :

- 1) Une régression des superficies consacrées aux céréales. Cette régression est due à la faible rentabilité de ces cultures en irrigation; c'est pourquoi il n'a pas été envisagé d'étendre les superficies consacrées à ces cultures dans le périmètre ; cultures, qui par ailleurs, sont actuellement pratiquées en sec avec une superficie de 5000 ha (2015).

2) L'extension des superficies consacrées aux cultures les plus fortement valorisées par l'irrigation, c'est-à-dire :

- Les cultures maraichères (tomate industrielle et légumes d'été) avec une superficie optimisée de 3800 ha et dont la superficie actuelle est de 750.16 ha (en 2015) ;
- Les agrumes, pour lesquelles sont proposés 273 hectares de plantations supplémentaires (500 ha actuellement plantés) localisée sur les meilleurs sols soit 773 hectares la superficie totale du verger ;
- Les fourrages, représentés par la vesce avoine, la luzerne, le sorgho et le maïs grain, occupent une superficie de 2000 ha (actuellement 14.55 ha), le maïs-grain et le sorgho, cultures encore mal connues dans la plaine, une superficie de 310 ha et de 314 ha respectives lui ont été consacrée par le modèle, la vesce avoine quant à elle, occupe la plus grande part dans cette répartition culturale avec une superficie de 1422 ha en AH et de 1137 ha en AM. Avec l'augmentation de la superficie consacrée aux fourrages, nous visons de relancer l'élevage dans la plaine et donc répondre aux besoins de la production de lait et de viande ;
- Une superficie de 1567 ha a été consacrée à la vigne de table, cette culture pérenne est pratiquement inexistante dans le périmètre.

D'une manière générale, l'analyse qui peut être faite à partir de la répartition optimale des cultures dans le périmètre, c'est qu'il existe une tendance à l'augmentation des superficies des cultures pour les trois années types (AH, AM, AS).

Lorsque nous avons comparé l'assolement actuel et initial avec le plan cultural proposé par le biais du modèle (figure VI.6), nous avons remarqué que les superficies simulées sont proches aux superficies de l'état initial du périmètre.

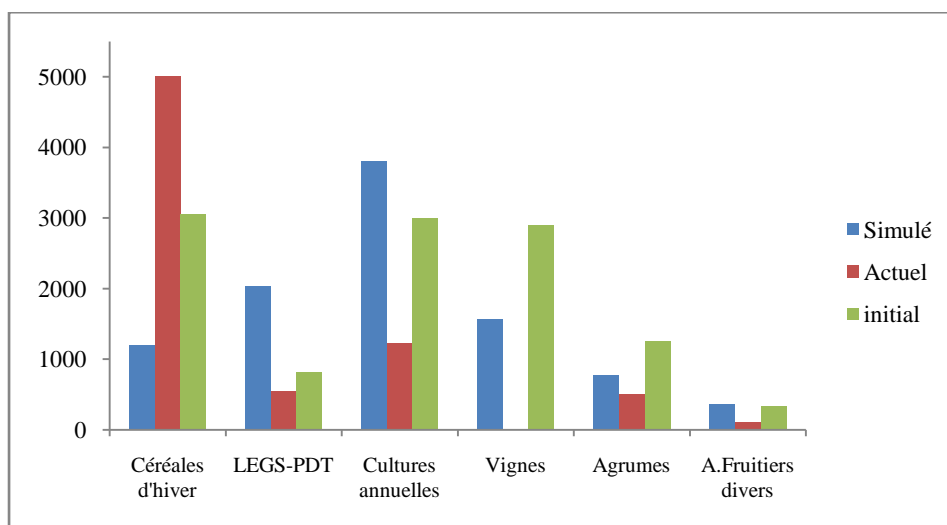


Figure.VI.6.Comparaison entre les superficies : actuelles, initiales et optimisés

Aussi, nous avons remarqué un changement du revenu brut procuré par les différents systèmes de cultures considéré dans l'optimisation. Ce changement de revenu est différent selon chaque type d'année climatique (tableaux VI.7). Ainsi, avec l'augmentation des superficies irriguées, les revenus des agriculteurs seront meilleurs et peuvent contribuer à la lutte contre la pauvreté et l'amélioration du niveau de vie dans le monde rural. Ceci permettra de réduire d'une manière significative l'exode vers les agglomérations urbaines.

Concernant la consommation en eau, une réduction importante du volume consommé, a été constatée en année sèche ; autrement dit, l'eau consommée est toujours en dessous du volume qu'on avait imposé comme contrainte dans le modèle et cela pour les trois années types.

VI.6. Conclusion

Par le biais de ce chapitre, et cela dans un milieu naturel diversifié tel que le périmètre de la Bounamoussa qui donne des systèmes de cultures variés, nous avons recherché des solutions qui puissent aider les gestionnaires à mieux gérer ce périmètre. Pour cela, Nous avons utilisé un modèle pour optimiser le plan cultural du périmètre, notamment pour montrer la possibilité d'augmenter les superficies irriguées.

A partir des premiers résultats obtenus, le modèle nous a permis de faire une répartition culturelle optimale du périmètre en envisageant différents scénarii (AH, AM, AS). Ces résultats nous ont permis de constater une diversité des cultures dans le périmètre entraînant des variations de volume d'eau consommée et pour conséquence des revenus différents. Le modèle a optimisé un plan cultural pour chaque scénario testé.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif visé à travers le choix de cette étude est double : Optimiser la gestion de l'eau du barrage de la Cheffia qui est situé en amont du périmètre de la Bounamoussa ; puis optimiser en aval, le plan cultural de ce périmètre, en vue de mieux valoriser le volume optimal alloué à l'irrigation.

Le premier objectif étant de dégager une méthodologie susceptible d'apporter une contribution au problème de la gestion de la ressource en eau ; et ce par l'élaboration de deux modèles d'optimisation: un modèle d'optimisation par les algorithmes génétiques et un deuxième modèle d'optimisation par la programmation dynamique. Ces deux modèles ont abouti à la gestion du barrage réservoir de la Cheffia.

Le deuxième objectif recherché par cette étude était de proposer un plan cultural optimal, en vue de favoriser un usage optimal de la ressource en eau, et de manière à améliorer la production agricole et par conséquent, améliorer les revenus des agriculteurs au niveau du périmètre de la Bounamoussa.

Les modèles que nous avons utilisés pour l'optimisation de la gestion de l'eau, constituent un outil d'aide à la décision et contribueront 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'el Taref à partir du barrage de la Cheffia, qui a été pris comme exemple d'application.

La recherche avec l'algorithme génétique et la programmation dynamique déterministe a mené à l'optimum. La politique de gestion dérivée de l'algorithme génétique, qui est prometteur et compétitif, est meilleure en la comparant avec celle issue de la programmation dynamique déterministe. En outre, l'algorithme génétique peut être efficacement utilisé pour dériver des politiques de gestion pour d'autres barrages-réservoirs.

En analysant les différences entre les deux politiques de gestion, nous avons remarqué 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 en périodes sèches en diminuant de peu les allocations dans les périodes humides.

L'analyse des résultats obtenus à partir de ces modèles 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.

La performance de ces politiques de gestion utilisant l'algorithme génétique et la programmation dynamique déterministe est comparée sur la base d'un certain nombre d'indices de performance. La comparaison entre tous les indices de performances a révélé

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

qu'il est essentiel de tenir compte de la fiabilité comme informations pour le décideur dans le domaine de la gestion des barrages réservoirs.

En outre, la résilience et la vulnérabilité maximales sont deux mesures importantes auxquelles le décideur doit donner une considération particulière étant donné que ces deux indices sont des mesures du plus grand et du plus sévère déficit. Les aspects liés aux divers indices de performance : de fiabilité, de résilience et de vulnérabilité, se révèlent être fréquemment essentiels dans le choix final de la stratégie de gestion à utiliser. Nous avons conclu que la politique de gestion issue des AG est la plus satisfaisante pour gérer, d'une manière convenable, la quantité d'eau disponible dans le barrage de la Cheffia.

Par conséquent, la méthodologie adoptée pour l'optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia est d'une grande importance, car elle permet d'avoir un outil d'aide à la décision applicable à n'importe quel autre barrage en prenant en considération ses caractéristiques propres.

En deuxième partie de ce travail de thèse, un modèle d'optimisation, basé sur la programmation non linéaire a été élaboré au niveau du périmètre, pour mieux répartir les cultures tout en respectant un volume optimal d'eau alloué à l'irrigation. Ce modèle nous a permis de faire une répartition culturale optimale pour les trois types d'années climatiques (humide, moyenne et sèche). Le modèle établi serait, à notre avis, facile à utiliser et l'augmentation du nombre de types de cultures ne devrait pas engendrer de difficultés particulières.

La commodité du modèle proposé se verrait à travers la simplification du calcul des besoins en eau, la modélisation des problèmes du même type obtenus par la fonction objectif utilisée et aussi à travers l'obtention de revenus bruts à partir de cette fonction.

En perspectives de ce travail, nous recommandons les tâches suivantes :

- ✓ 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 ;
- ✓ Utiliser d'autres modèles d'optimisation tels que : les essaims particuliers, les colonies de fourmis, le recuit simulé, le data mining, les réseaux de neurones et la neuro-floue ;
- ✓ Introduire de nouvelles fonctions objectifs telles que la minimisation du coût ;
- ✓ Introduire d'autres contraintes pour modéliser le plan cultural du périmètre à savoir : la nature des sols ;

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

- ✓ Reprendre cette optimisation du plan cultural à l'échelle d'exploitations représentatives du périmètre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

1. Ackley, D. H. (1987). An empirical study of bit vector function optimization. *Geneticalgorithms and simulatedannealing*, 1, 170-204.
2. AGID., 2005, « Diagnostic des infrastructures hydrauliques des périmètres gérés par les offices régionaux et de Wilayates » Rapport général. Volume (1) 2005.
3. AitKadi, M. 2001,«The applications of optimization techniques to water resourcesproblems».CIHEAM – Option Méditerranéenne.
4. Akter, T., &Simonovic, S. P. (2004). Modellinguncertainties in short-termreservoiroperationusingfuzzy sets and a geneticalgorithm/Modélisation d'incertitudes dans la gestion de barrage à court terme grâce à des ensembles flous et à un algorithme génétique. *Hydrological sciences journal*, 49(6).
5. Alcamo, J., Lake, P. S., Palmer, M. A., ReidyLiermann, C. A., Nilsson, C., Flörke, M., & Bond, N. (2008). Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2), 81-89.
6. Ahmed, J. A., &Sarma, A. K. (2005). Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. *Water Resources Management*, 19(2), 145-161.
7. Amir, I., & Fisher, F. M. (1999). Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model. *Agricultural systems*, 61(1), 45-56.
8. Anctil, F., Lauzon, N., Andréassian, V., Oudin, L., & Perrin, C. (2006). Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization. *Journal of hydrology*, 328(3), 717-725.

B

9. Bazara, M., SheraliHanif, D., &Shetty, C. M. (1993). Nonlinear programming theory and algorithms.Editeur : John Wiley& Sons, Inc. Date de parution :1993. ISBN : 0471557935. Lieu d'édition : New York.
10. Benblidia, H. et Gaëlle Thivet. (2010).Gestion des ressources en eau: les limites d'une politique de l'offre . Les notes d'analyse du CIHEAM. N°58.Mai 2010.
11. Bogachan B., &Kodal, S. (2003). A non-linear model for farm optimization with adequate and limited water supplies: application to the South-east Anatolian Project (GAP) Region. *Agricultural water management*, 62(3), 187-203.
12. Boustani, F., &Mohammadi, H. (2010). Determination of optimal cropping pattern Due to water deficit: a case study in the south of Iran. *Am Eurasian J Agric Environ Sci*, 7(5), 591-595.
13. Bradfield, R., Wright, G., Burt, G., Cairns, G., & Van Der Heijden, K. (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 37(8), 795-812.
14. Budhakoonaaroen, S., Harboe, R., &Bogardi, J. J. (1990). Application of the modified fibonacci search-based search beam method to derive a nondominated release policy for a multi-purpose reservoir. *Water Resources Management*, 4(1), 63-74.

C

15. Cancelliere, A., Giuliano, G., Rossi, G. &Nicolosi, V.(2005). A reservoir operation DSS based on optimization and neuro-fuzzy techniques. In *Proceedings of XXXI IAHR Congress on Water Engineering for the future: Choice and Challenges*, Seoul, Korea (pp. 271-279).
16. Carpenter, T. M., &Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of Hydrology*, 329(1), 174-185.
17. Carvalho, H. O., Holzapfel, E. A., Lopez, M. A., & Marino, M. A. (1998). Irrigated cropping optimization. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124(2), 67-72.
18. Chang, C. L., Lo, S. L., & Yu, S. L. (2005). Applying fuzzy theory and genetic algorithm to interpolate precipitation. *Journal of Hydrology*, 314(1), 92-104.

19. Chang, L. C., & Chang, F. J. (2009). Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. *Journal of hydrology*, 377(1), 12-20.
20. Chang, L. C., Chang, F. J., Wang, K. W., & Dai, S. Y. (2010). Constrained genetic algorithms for optimizing multi-use reservoir operation. *Journal of Hydrology*, 390(1), 66-74.
21. Cheng, R., & Gen, M., (2000). *Genetic algorithms and engineering optimization* (Vol. 7). John Wiley & Sons.

D

22. Dagnelie, P. (1998). *Statistiques théoriques et appliquées*, de Boeck et Larcier. Bruxelles, Belg.
23. Dréo, J., Pétrowski, A., Siarry, P., & Taillard, E. (2003). *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile* (p. 356). Eyrolles.

E

24. Eastman, J., & ReVelle, C. (1973). Linear decision rule in reservoir management and design: 3. Direct capacity determination and intraseasonal constraints. *Water resources research*, 9(1), 29-42.

F

25. Fang, Z. X., Voron, B., & Bocquillon, C. (1989). Programmation dynamique: application à la gestion d'une retenue pour l'irrigation. *Hydrological sciences journal*, 34(4), 415-424.

G

26. Girard, G., & Villeneuve, J. P. (1981). *Le modèle couplé: simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique*. ORSTOM.
27. Geronimi, M. (2002). Managing surface water –groundwater to restore fall flows in the cosumre river. *Journal of water. Resources Planing and Management – A.S.C.E.* 130 (4) 301-310.
28. Gundelach, J., & ReVelle, C. (1975). Linear decision rule in reservoir management and design: 5. A general algorithm. *Water Resources Research*, 11(2), 204-207.

H

29. Haddad, O. B., Moradi-Jalal, M., Mirmomeni, M., Kholghi, M. K., & Mariño, M. A. (2009). Optimal cultivation rules in multi-crop irrigation areas. *Irrig Drain*, 58(1), 384-394.
30. Haouari, M., & Azaiez, M. N. (2001). Optimal cropping patterns under water deficits. *European Journal of Operational Research*, 130(1), 133-146.
31. Hashemi, M. S., Barani, G. A., & Ebrahimi, H. (2008). Optimization of reservoir operation by genetic algorithm considering inflow probabilities (Case study: The Jiroft dam reservoir). *Journal of Applied Sciences*, 8, 2173-2177.
32. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water resources research*, 18(1), 14-20.
33. Hiew, K. L. (1987). *Optimization algorithms for large-scale multireservoir hydropower systems*. Colorado State Univ., Fort Collins, CO (USA).
34. Houck, M. H., & Datta, B. (1981). Performance evaluation of a stochastic optimization model for reservoir design and management with explicit reliability criteria. *Water Resources Research*, 17(4), 827-832.

J

35. Janova, J. (2014). Crop plan optimization under risk on a farm level in the Czech Republic. *Agric. Econ.–Czech*, 60, 123-132.
36. Jonch-Clausen, T., Agarwal A., de los Angelos, M.S., R. Bhatia et Cheret I. (1996). La gestion intégrée des ressources en eau. Background Papers n°4. Partenariat mondial pour l'eau. Comité technique. 80p.

K

37. Karamouz, M., Zahraie, B., &Araghinejad, S. (2005). Decision support system for monthly operation of hydropower reservoirs: A case study. *Journal of computing in civil engineering*, 19(2), 194-207.
38. Kaur, B., Sidhu, R. S., &Vatta, K. (2010). Optimal crop plans for sustainable water use in Punjab. *Agric. Econ. Res. Rev*, 23(2), 273-284.
39. KhandjariSadati, S., Speelman, S., Sabouhi, M., Gitizadeh, M., &Ghahraman, B. (2014). Optimal irrigation water allocation using a genetic algorithm under various weather conditions. *Water*, 6(10), 3068-3084.
40. Kjeldsen, T. R., &Rosbjerg, D. (2004). Choice of reliability, resilience and vulnerabilityestimators for riskassessments of water resourcessystems/Choix d'estimateurs de fiabilité, de résilience et de vulnérabilité pour les analyses de risque de systèmes de ressources en eau. *Hydrological sciences journal*, 49(5).
41. Kumar, C. N., Indrasenan, N., &Elango, K. (1998). Nonlinear programming model for extensive irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124(2), 123-126.
42. Kundzewicz, Z. W., & Kindler, J. (1995). Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resource systems. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 231, 217-224.
43. Kundzewicz, Z. W., & Laski, A. (1995). Reliability-related criteria in water supply studies. *New Uncertainties Concepts in Hydrology and Water Resources*, 299-305.
44. Kuo, C. C., Gan, T. Y., & Yu, P. S. (2010). Seasonal streamflow prediction by a combined climate-hydrologic system for river basins of Taiwan. *Journal of hydrology*, 387(3), 292-303.

L

45. Labadie, J. W. (1990). Dynamic programming with the microcomputer. *Encyclopedia of microcomputers*, 5, 275-338.
46. Llamas, J. (1985). *Hydrologie générale: principes et applications*. G. Morin.
47. Lin, G. F., & Wang, C. M. (2007). A nonlinear rainfall–runoff model embedded with an automated calibration method–Part 1: The model. *Journal of Hydrology*, 341(3), 186-195.
48. Leenhardt, D., Cernesson, F., Mari, J. F., & Mesmin, D. (2005). Anticiper l'assolement pour mieux gérer les ressources en eau: comment valoriser des données d'occupation du sol?. *Ingénierie-EAT*, (42), 13-22.
49. LeRoy, P., Engelman, R., Harrison, P., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H., & Daily, G. C. (1993). Sustaining water. Population and the future of renewable water supplies. *POPULATION AND DEVELOPMENT REVIEW*, 19(1), 1-32.
50. Loucks, D. P., &Dorfman, P. J. (1975). An evaluation of some linear decision rules in chance-Constrained models for reservoir planning and operation. *Water ResourcesResearch*, 11(6), 777-782.

M

51. Mahmoud, M., Liu, Y., Hartmann, H., Stewart, S., Wagener, T., Semmens, D., ...&Hulse, D. (2009). A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software*, 24(7), 798-808.

52. Mainuddin, M., Gupta, A. D., & Onta, P. R. (1997). Optimal crop planning model for an existing groundwater irrigation project in Thailand. *Agricultural Water Management*, 33(1), 43-62.
53. Mantoglou, A., & Papantoniou, M. (2008). Optimal design of pumping networks in coastal aquifers using sharp interface models. *Journal of hydrology*, 361(1), 52-63.
54. Michalewicz, Z., & Janikow, C. Z. (1991, June). Handling Constraints in Genetic Algorithms. In *ICGA* (pp. 151-157).
55. Moy, W. S., Cohon, J. L., & ReVelle, C. S. (1986). A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. *Water Resources Research*, 22(4), 489-498.
56. Musy, A., & Higy, C. (1998). *Hydrologie appliquée* (No. HYDRAM-BOOK-1998-001). Edition H* G* A.

O

57. O.C.D.D., (2000). Politique de gestion intégrée des ressources en eau ». Banque africaine de développement. Avril. 2000.
58. Otieno, F., & Adeyemo, J. (2011). Multi-objective cropping pattern in the Vaalharts irrigation scheme. *African Journal of Agricultural Research*, 6(6), 1286-1294.
59. Otoo, J., Ofori, J. K., & Amoah, F. Optimal Selection Of Crops: A Casestudy Of Small Scale Farms In Fanteakwa District, Ghana.

P

60. Pabiot, F. (1999). Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride: projet MERGUSIE.
61. Parent, E. (1991). *Elaboration des consignes de gestion des barrages-réservoirs* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
62. Park, C. H., & Aral, M. M. (2004). Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers. *Journal of Hydrology*, 290(1), 80-99.
63. Parthasarathi, C., & Sil, B. S. (2010). Integrated water and sediment flow simulation and forecasting models for river reaches. *Journal of hydrology*, 385(1), 313-322.

Q

64. Quinn, P. F., Hewett, C. J., & Doyle, A. (2004). Scale appropriate modelling: from mechanisms to management. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports*, 287, 17-38.

R

65. Reça, J., Roldán, J., Alcaide, M., López, R., & Camacho, E. (2001). Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems: I. Description of the model. *Agricultural water management*, 48(2), 103-116.
66. ReVelle, C., & Gundelach, J. (1975). Linear decision rule in reservoir management and design: 4. A rule that minimizes output variance. *Water Resources Research*, 11(2), 197-203.
67. ReVelle, C., & Kirby, W. (1970). Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design: 2. Performance Optimization. *Water Resources Research*, 6(4), 1033-1044.
68. ReVelle, C., Joeres, E., & Kirby, W. (1969). The linear decision rule in reservoir management and design: 1, Development of the stochastic model. *Water Resources Research*, 5(4), 767-777.
69. Peralta, R. C., Forghani, A., & Fayad, H. (2014). Multiobjective genetic algorithm conjunctive use optimization for production, cost, and energy with dynamic return flow. *Journal of Hydrology*, 511, 776-785.
70. ROUISSAT, B. (2012). *Analyse systémique appliquée aux aménagements hydrauliques* (Doctoral dissertation, Université de Tlemcen).

71. Russell, S. O., & Campbell, P. F. (1996). Reservoir operating rules with fuzzy programming. *Journal of water resources planning and management*, 122(3), 165-170.

S

72. Schmidt, O, Erich, J. Plate (1983). Optimization of reservoir operation for irrigation and determination of the optimum size of the irrigation area. Scientific Procedures Applied to planning, Design and Management of Water Ressources Systems (Proceedings Hamburg. Symposium, August 1983) IAHS Publ. n° 147.
73. Sebari, K. (2004). Optimisation de la gestion conjointe des ressources en eau de surface et des ressources en eau souterraines dans une région semi-aridela vallée du Drâa. Thèse de doctorat – université catholique de couvain. 193p.
74. Sheng – Freng, K. and Chen – Wring. L. (2003). Simulation and optimization model for irrigation planning and management. Hydr. Process. In interscience.
75. Simonovic, S. P., & Mariño, M. A. (1980). Reliability programing in reservoir management: 1. Single multipurpose reservoir. *Water Resources Research*, 16(5), 844-848.
76. Sreekanth, J., & Datta, B. (2010). Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using genetic programming and modular neural network based surrogate models. *Journal of Hydrology*, 393(3), 245-256.
77. Stam, J. (1998, July). Exact evaluation of Catmull-Clark subdivision surfaces at arbitrary parameter values. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 395-404). ACM.

T

78. Tejada-Guibert, J. A., Stedinger, J. R., & Staschus, K. (1990). Optimization of value of CVP's hydropower production. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(1), 52-70.
79. Teegavarapu, R. S., Tufail, M., & Ormsbee, L. (2009). Optimal functional forms for estimation of missing precipitation data. *Journal of hydrology*, 374(1), 106-115.
80. Todini, E. (2007). Hydrological catchment modeling. Past, present and future . *Hydrological and earth system sciences* 11 (1) : p. 468 - 482.
81. Ioannis Tsoukalas, Christos Makropoulos, (2015). Multiobjective optimisation on a budget: Exploring surrogate modelling for robust multi-reservoir rules generation under hydrological uncertainty *Environmental Modelling & Software* 69 (2015) 396-413.
82. Taesoon Kim, Jun-Haeng Heo, Deg-Hyo Bae and Jin-Hoon Kim (2008). Single-reservoir operating rules for a year using multiobjective genetic algorithm.

V

83. Vidal, A., Belouze, P., Laloux, S., & Lepoutre, D. (1997). Gestion de l'eau et intégration de données spatialisées. *Ingénieries-EAT*, (10), p-65.
84. Vogel, R. M., & Bolognese, R. A. (1995). Storage-reliability-resilience-yield relations for over-year water supply systems. *Water Resources Research*, 31(3), 645-654.

W

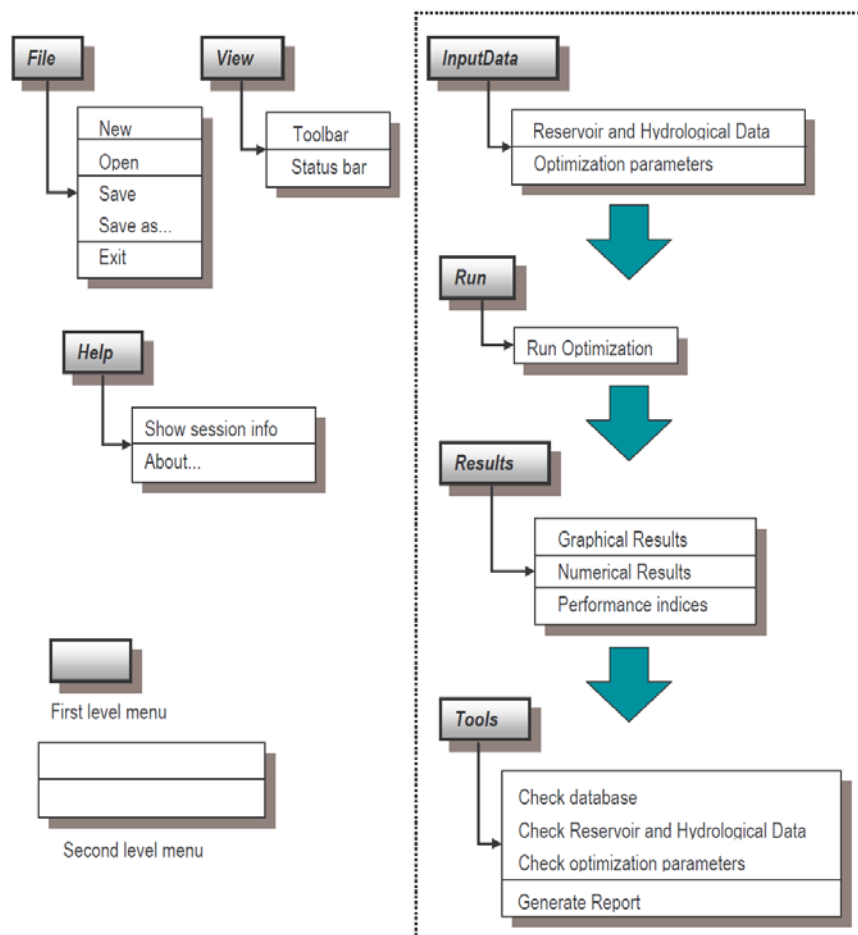
85. Walter, É., & Pronzato, L. (1994). *Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales*. Masson.
86. Wurbs, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of water resources planning and management*, 119(4), 455-472.

Z

87. Zhang, X., Srinivasan, R., & Bosch, D. (2009). Calibration and uncertainty analysis of the SWAT model using Genetic Algorithms and Bayesian Model Averaging. *Journal of Hydrology*, 374(3), 307-317.

Annexe1 : Présentation du logiciel RESOPTI

Le RESOPTI est un logiciel qui permet d'optimiser les lâchers d'un réservoir par la technique de la programmation dynamique. Le logiciel est écrit en Visual Basic 6.0 et il est basé sur un noyau de calcul CSUDP (GENERALIZED DYNAMIC PROGRAMMING) développé par Labadie (1990), à l'Université du Colorado, et fonctionne sous Windows 95/98.



Annexe 2: Résultats de l'optimisation par la programmation dynamique déterministe à l'aide du programme RESOPTI

RESOPTI Report for project : chafia.rst

Module for determining optimal releases from a reservoir using Dynamic Programming technique.

Date : 01/07/2016

Time : 11:26:31

- RESERVOIR DATA -

Reservoir name : chafia

Minimum storage volume [1E+6 m³] : 30

Maximum storage volume [1E+6 m³] : 171.992

Storage-area relationship option : Power formula

Storage-area relationship coefficients : 0.008 0.962

- HYDROLOGICAL DATA -

Data source : C:\Program Files\RESOPTI

Interface\projects\CHAFIA.mdb

Evaporation losses [mm / month] : Read evaporation rate from database

- OPTIMIZATION PARAMETERS -

First year of optimization period : 1981

Last year of optimization period : 2010

Monthly demands [1E+6 m³ / month] : Read demands from database

Splicing options

Discretization interval on storage - initial [1E+6 m³] : 1

Discretization interval on storage - final [1E+6 m³] :

0.01

Discretization splicing factor : 2

Multiple of current interval defining upper and lower limits

on new corridor [1E+6 m³] : 1

Storage bounds

Initial stage [1E+6 m³] : 30

Final stage min [1E+6 m³] : 30

Final stage max [1E+6 m³] : 171.992

Monthly values [1E+6 m³] :

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct									
Nov									
Dec									
Min	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Max	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992
171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992	171.992

- NUMERICAL RESULTS : RESERVOIR PERFORMANCE INDICES -

Mean monthly inflows [1E+6 m³ / month] :

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct									
Nov									
Dec									
Total	1.39	1.18	6.65	21.33	30.5	26.74	16.86	17.4	7
1.75	1.51	1.35	133.66						

Mean monthly demands [1E+6 m³ / month] :

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct									
Nov									
Dec									
Total	10.33	7.83	5.83	4.33	4.33	4.33	4.33	5.83	9.33
12.33	19.33	13.83	101.96						

Mean monthly evaporation losses [1E+6 m³ / month] :

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	0								
Dec	0								
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mean monthly net releases [1E+6 m ³ / month] :									
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct	9.26	6.78	5.06	3.69	3.71	3.71	3.71	5.18	8.53
Nov	11.52	18.52	13.02	92.69					
Dec									
Total	9.26	6.78	5.06	3.69	3.71	3.71	3.71	5.18	8.53
Mean monthly spills [1E+6 m ³ / month] :									
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct	0.02	0.02	0.03	4.1	10.13	11.73	4.35	7.52	1.58
Nov	0	0	39.48						
Dec									
Total	0.02	0.02	0.03	4.1	10.13	11.73	4.35	7.52	1.58
Mean monthly net releases (% mean monthly demands) :									
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Oct	89.64	86.59	86.79	85.22	85.68	85.68	85.68	88.85	91.43
Nov	93.43	95.81	94.14	0					
Dec									
Total	89.64	86.59	86.79	85.22	85.68	85.68	85.68	88.85	91.43

Reliability indices

Time reliability (% months) : 37.78

Volumetric reliability (% demand) : 90.9

Vulnerability indices

75.31 Max monthly deficit [1E+6 m³ / month],(% demand) : 7.78

44.2 Max annual deficit [1E+6 m³ / month],(% demand) : 45.07

Sum of squared deficits [(1E+6 m³ / month)²] : 819.24

Beard index (%) : 5.22

VOIR TABLEAU DES INDICES DE PERFORMANCE (CHAPITRE 5)

Project chafia.rst covers from 1981 to 2010. Results are shown below.

Year	Month	Stage	Initial Vol.	Inflow	Evapor.	Release	Final Vol.	Demand	Deficit	Net Rel.	Spill
1981	Jan	000001	30	2.55	0	2.55	30	10.33	7.78	2.55	0
	Feb	000002	30	0.78	0	0.78	30	7.83	7.05	0.78	0
	Mar	000003	30	1.15	0	1.15	30	5.83	4.68	1.15	0
	Apr	000004	30	15.2	0	3.73	41.47	4.33	0.6	3.73	0
	May	000005	41.47	28.49	0	3.72	66.24	4.33	0.61	3.72	0
	Jun	000006	66.24	22.05	0	3.73	84.57	4.33	0.6	3.73	0
	Jul	000007	84.57	7.18	0	3.72	88.02	4.33	0.61	3.72	0
	Aug	000008	88.02	4.1	0	5.23	86.89	5.83	0.6	5.23	0
	Sep	000009	86.89	2.69	0	8.72	80.86	9.33	0.61	8.72	0
	Oct	000010	80.86	3.06	0	11.72	72.2	12.33	0.61	11.72	0
	Nov	000011	72.2	3.6	0	18.73	57.07	19.33	0.6	18.73	0
	Dec	000012	57.07	3.47	0	13.22	47.32	13.83	0.61	13.22	0
1982	Jan	000013	47.32	2.79	0	9.73	40.38	10.33	0.6	9.73	0
	Feb	000014	40.38	2.12	0	7.23	35.27	7.83	0.6	7.23	0
	Mar	000015	35.27	0.73	0	5.23	30.78	5.83	0.6	5.23	0

NOTE:

Volume is expressed in millions of cubic meters (1E+06 m³)

Inflow, Evaporation, Release, Demand, Deficit, Net Release and Spills are expressed in millions of cubic meters per month (1E+06 m³/month)

Annexes 3 : Modèle Markovien multi-classes

Tableau n° V.1 : Matrice contenant les bornes des classes de chaque saison.

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

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

	Saison 1	Saison 2	Saison 3	Saison4	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

Tableau n° V.3: 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.4 : 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.5 : 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.6 : 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

Annexe 4 : Résultat Réseau de Neurone

Tableau n° V.7 : 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.8 : 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.9 : Poids de la couche cachée vers la couche de sortie.

	$W_{1,j}$	$W_{2,j}$	$W_{3,j}$	$W_{4,j}$	$W_{5,j}$	$W_{6,j}$	$W_{7,j}$	$W_{8,j}$	$W_{9,j}$	$W_{10,j}$	$W_{11,j}$	$W_{12,j}$	$W_{13,j}$
$N(1)$	-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
$N(2)$	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
$N(3)$	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.10 : Biais de la couche de sortie.

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

Annexe 5 : Evolution des superficies irriguées

Années	Superficies irriguées	Années	Superficies irriguées
1971	1000	1994	6855
1972	1300	1995	4875
1973	1600	1996	5483
1974	2260	1997	4132
1975	2500	1998	3184
1976	3460	1999	3841
1977	4400	2000	3500
1978	5400	2001	3187
1979	5530	2002	0
1980	8030	2003	3300
1981	6150	2004	300
1982	8320	2005	3377
1983	8110	2006	2482
1984	6920	2007	2552
1985	8490	2008	2128,51
1986	8500	2009	1114,05
1987	10000	2010	1842,95
1988	9600	2011	3017,85
1989	371	2012	2830,2
1990	490	2013	2510,55
1991	3700	2014	1826,95
1992	3500	2015	2606,8
1993	4900		

Annexe 6 : Evolution de la consommation en eau du périmètre

Années	Volumes alloués	Volumes lâchers	Années	Volumes alloués	Volumes lâchers
1986	40	35	2001	35	33,72
1987	50	42	2002	0	0
1988	30	29,5	2003	40	37
1989	1	0,7	2004	30	26
1990	1,5	1,2	2005	30	26,3
1991	40	20	2006	35	35
1992	45	30	2007	30	26,2
1993	40	38,8	2008	25	21,75
1994	40	38,4	2009	23	19,01
1995	30	29,5	2010	25	18,31
1996	25	23,5	2011	20	20
1997	25	6,5	2012	23	20,09
1998	35	30	2013	27,13	23
1999	35	30	2014	27,554	22
2000	26,4	25	2015	35,34	23

Annexe 7 : Les cultures sur lesquelles a été axée la modélisation.

SETS p crops / Ble

Orge

Tomate

Betterave

Poischiche

Feve

PDTAS

PDTS

OignonS

OignonF

Ail

HaricotV

HaricotB

Poivron

Concombre

Courgette

Aubergines

Carotte

ChouxFleur

Choux

Melon

Pasteque

Luzerne

VesceAvoine

SorghoG

MaisG

Agrumes

Abricotier

Pecher

Prunier

Pommier

Poirier

Vignes/

Annexe n° 8 Optimisation du plan cultural (année humide)

GAMS 24.1.2 r40979 Released Jun 16, 2013 WEX-WEI x86_64/MS Windows
General Algebraic Modeling System
Compilation

```
1  SETS  p crops / Ble
2          Orge
3          Tomate
4          Betterave
5          poischiche
6          Feve
7          PDTAS
8          PDTS
9          OignonS
10         OignonF
11         Ail
12         HaricotV
13         HaricotB
14         Poivron
15         Concombre
16         Courgette
17         Aubergines
18         Carrotte
19         ChouxFleur
20         Choux
21         Melon
22         Pastèque
23         Luzerne
24         VesceAvoine
25         SorghoG
26         MaisG
27         Agrumes
28         Abricotier
29         Pecher
30         Prunier
31         Pommier
32         Poirier
33         Vignes/

210 Model crops / all /;
211
212 SOLVE crops USING NLP MAXIMIZING obj
213 FILE res /crop1.txt/;
```

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	crops	OBJECTIVE	obj
TYPE	NLP	DIRECTION	MAXIMIZE
SOLVER	CONOPT	FROM LINE	213

---- land =L= S(p) land balance (ha)

```
**** REPORT SUMMARY :            0      NONOPT
                                  0      INFEASIBLE
                                  0      UNBOUNDED
                                  0      ERRORS
```

crop	land
Ble	1200.00
Orge	0.00
VesceAvoine	1422.27
Luzerne	277.90
SorghoG	0.00
MaisG	299.83
poischiche	1000.00

Feve	0.00
PDTS	246.26
OignonS	0.00
OignonF	0.00
Ail	0.00
HaricotV	0.00
Choux	0.00
Courgette	1069.71
Aubergines	484.03
Carrotte	0.00
ChouxFleur	0.00
Tomate	1218.92
Betterave	0.00
PDTAS	781.08
HaricotB	0.00
Poivron	0.00
Melon	0.00
Pasteque	0.00
Agrumes	272.73
Abricotier	0.00
Pecher	0.00
Prunier	356.14
Pommier	0.00
Poirier	0.00
Vignes	1566.84

Annexe n° 9 Optimisation du plan cultural (année moyenne)

GAMS 24.1.2 r40979 Released Jun 16, 2013 WEX-WEI x86_64/MS Windows
 General Algebraic Modeling System
 Compilation

```

1 SETS p crops / Ble
2           Orge
3           Tomate
4           Betterave
5           poischiche
6           Feve
7           PDTAS
8           PDTS
9           OignonS
10          OignonF
11          Ail
12          HaricotV
13          HaricotB
14          Poivron
15          Concombre
16          Courgette
17          Aubergines
18          Carrotte
19          ChouxFleur
20          Choux
21          Melon
22          Pasteque
23          Luzerne
24          VesceAvoine
25          SorghoG
26          MaisG
27          Agrumes
28          Abricotier
29          Pecher
30          Prunier
31          Pommier
32          Poirier
33          Vignes/

```

```

210 Model crops / all /;
211
212 SOLVE crops USING NLP MAXIMIZING obj
213 FILE res /crop1.txt/;

```

S O L V E S U M M A R Y

```

MODEL   crops
TYPE    NLP
SOLVER  CONOPT
OBJECTIVE obj
DIRECTION MAXIMIZE
FROM LINE 213

```

---- land =L= S(p) land balance (ha)

```

**** REPORT SUMMARY :
0        NONOPT
0        INFEASIBLE
0        UNBOUNDED
0        ERRORS

```

crop	land
Ble	1200.00
Orge	0.00
Luzerne	239.52
VesceAvoine	1136.80
SorghoG	313.89
MaisG	309.79
poischiche	583.37
Feve	416.58
PDTS	443.09
OignonS	0.00
OignonF	0.00
Ail	0.00
HaricotV	0.00
Courgette	1097.95
Aubergines	258.96
Carrotte	0.00
ChouxFleur	0.00
Choux	0.00
Tomate	899.10
Betterave	0.00
PDTAS	870.69
HaricotB	0.00
Poivron	0.00
Melon	0.00
Pasteque	230.21
Agrumes	272.73
Abricotier	0.00
Pecher	0.00
Prunier	356.14
Pommier	0.00
Poirier	0.00
Vignes	1566.84

Annexe n° 10 Optimisation du plan culturel (année sèche)

GAMS 24.1.2 r40979 Released Jun 16, 2013 WEX-WEI x86_64/MS Windows
G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m
C o m p i l a t i o n

```

1 SETS p crops / Ble
2            Orge
3            Tomate
4            Betterave
5            poischiche
6            Feve
7            PDTAS

```

8 PDS
 9 OignonS
 10 OignonF
 11 Ail
 12 HaricotV
 13 HaricotB
 14 Poivron
 15 Concombre
 16 Courgette
 17 Aubergines
 18 Carotte
 19 ChouxFleur
 20 Choux
 21 Melon
 22 Pastèque
 23 Luzerne
 24 VesceAvoine
 25 SorghoG
 26 MaisG
 27 Agrumes
 28 Abricotier
 29 Pecher
 30 Prunier
 31 Pommier
 32 Poirier
 33 Vignes/

210 Model crops / all /;
 211
 212 SOLVE crops USING NLP MAXIMIZING obj
 213 FILE res /crop1.txt/;

S O L V E S U M M A R Y

MODEL	crops	OBJECTIVE	obj
TYPE	NLP	DIRECTION	MAXIMIZE
SOLVER	CONOPT	FROM LINE	213

---- land =L= S(p) land balance (ha)

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

crop	land
Blé	500.00
Orge	0.00
Luzerne	0.00
VesceAvoine	701.10
SorghoG	0.00
MaisG	219.15
poischiche	303.70
Feve	196.30
Betterave	0.00
PDTAS	599.14
HaricotB	0.00
Poivron	17.19
Melon	0.00
Pastèque	183.67
PDS	0.00
OignonS	263.82
OignonF	503.46
Ail	0.00
HaricotV	0.00
Courgette	0.00

Aubergines	64.58
Carrotte	168.13
ChouxFleur	0.00
Choux	0.00
Agrumes	272.73
Abricotier	0.00
Pecher	0.00
Prunier	356.14
Pommier	0.00
Poirier	0.00
Vignes	1566.84

Résumé

Ce travail de recherche est axé sur l'optimisation de la gestion du barrage de la Cheffia par les algorithmes génétiques et la programmation dynamique déterministe. Une comparaison a été faite entre ces deux méthodes, en termes de probabilité d'apparition des allocations (pénalités), de taux de satisfactions et aussi en termes d'indices de performance du barrage, à savoir les indices de fiabilité, de vulnérabilité et de résilience. 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 30 Mm^3 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 scénario de débits futurs. La deuxième étape de notre travail consiste en une répartition de la superficie consacrée à chaque culture en utilisant la ressource allouée à l'irrigation, pour cela nous avons optimisé un plan cultural pour chaque type d'années, trois scénarii ont été proposés : un scénario humide, un scénario moyen et un scénario sec, il s'agit de chercher une répartition culturelle tout en ajoutant des contraintes que nous avons imposé dans le programme afin de maximiser le revenu et de diminuer la consommation en eau. Nous avons utilisé ce modèle notamment pour montrer la possibilité d'augmenter les superficies irriguées et recherché des solutions qui puissent aider les gestionnaires à mieux gérer ce périmètre.

Abstract

This research is focused on optimizing the management of the dam Cheffia by genetic algorithms and deterministic dynamic programming. A comparison was made between the two methods in terms of probability of occurrence of allowances (penalties), rates of satisfaction and also in terms of dam performance indices, namely the reliability indices of vulnerability and resilience. Two objectives were chosen: The first is to meet the demand of various user sectors giving priority to the ASP respectively, AEI, and irrigation and the second to ensure a minimum stock of 30 Mm^3 in the dam. The management is carried out in an uncertain future, we have developed a Markov model multi class which allowed us to simulate a scenario of future flows. The next step of our work is a division of the area devoted to each crop using the resource allocated to irrigation, therefore we have optimized a cultural plan for each type of years, three scenarios were proposed: Scenario wet, dry and average scenario scenario, it is to seek a crop distribution while adding constraints that we imposed in the program to maximize revenue and reduce water consumption. We used this model in particular to show the possibility of increasing irrigated areas and sought solutions that can help managers better manage this perimeter.

ملخص

ويركز هذا البحث على تحسين إدارة السد Cheffia بواسطة الخوارزميات الجينية والبرمجة الديناميكية حتمية. وقدم مقارنة بين الطريقتين من حيث احتمال حدوث البدلات (العقوبات)، ومعدلات رضا وأيضاً من حيث مؤشرات الأداء السد، وهي مؤشرات موثوقية الضعف و مرونة. وقد تم اختيار هدفين: الأول هو لتلبية الطلب من مختلف قطاعات المستخدمين مع إعطاء الأولوية لآسيا والمحيط الهادئ على التوالي، AEI، والرري، والثاني لضمان حد أدنى من الأسهم من 30 مم^3 في السد. يتم تسيير في مستقبل مجهول، قمنا بتطوير نموذج ماركوف الطبقة متعددة التي سمحت لنا لمحاكاة سيناريو للتدفقات المستقبلية. المرحلة الثانية من عملنا هو تقسيم المساحة المخصصة لكل المحاصيل باستخدام الموارد المخصصة للرري، وبالتالي فإننا قمنا الأمثل خطة الثقافية لكل نوع من أنواع سنوات، تم اقتراح ثلاثة سيناريوهات: سيناريو الرطب، متوسط السيناريو وسيناريو الجاف، هو أن تسعى لتوزيع المحاصيل بينما تضيف القيود التي تفرض علينا في البرنامج لتحقيق أقصى قدر من الدخل والحد من استهلاك المياه. استخدمنا هذا النموذج على وجه الخصوص لإظهار إمكانية زيادة المساحات المروية والحلول سعى التي يمكن أن تساعد المديرين على ادارة افضل لهذا المحيط.