

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Optimisation de la gestion des barrages-réservoir en Algérie..

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 8-0003-22

APA Citation ( APA توثيق ):

Boudjerda, Merouane. (2022). Optimisation de la gestion des barrages-réservoir en Algérie. [Thèse de doctorat, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE

**ENSH - (n ° d'ordre)**

**THESE DE DOCTORAT  
DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Présentée par

**BOUDJERDA Merouane**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE**

Sujet de la thèse :

**OPTIMISATION DE LA GESTION DES BARRAGES-RESERVOIR EN ALGERIE**

Thèse présentée et soutenue à Blida le 04/07/2022 devant le jury composé de :

HADJ SADOK Ahmed	Président	Professeur (ENSH-Blida)
SOUAG Doudja	Examinatrice	Professeur (USTHB-ALGER)
BENMAMAR Saâdia	Examinatrice	Professeur (ENP-ALGER)
KAHLERRAS Djilali	Examineur	MCA (ENSH-Blida)
TOUAIBIA Bénina	Directrice de thèse	Professeur (ENSH-Blida)
MIHOUBI Mustapha Kamel	Co-directeur de thèse	Professeur (ENSH-Blida)

Année Universitaire 2021/2022

# REMERCIEMENTS

*"Je remercie Dieu tout puissant pour nous avoir inspiré et guidé dans nos pas pour l'accomplissement ce travail"*

En premier lieu, je tiens à remercier ma directrice de thèse M<sup>me</sup> Bénina TOUAIBIA, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique pour avoir accepté de diriger mes travaux de thèse. Qu'elle trouve l'expression de ma profonde reconnaissance pour les orientations, suggestions et conseils qu'elle m'a prodigués.

Je désire aussi remercier mon co-directeur de thèse, Mr Mustapha Kamel MIHOUBI, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH) pour avoir accepté de me diriger, pour ses remarques, commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

Je suis très reconnaissant à Monsieur HADJ SADOK Ahmed., Professeur à l'ENSH d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Je tiens vivement à remercier Professeur KAHLERRAS Djilali, de l'ENSH, Professeur Doudja SOUAG de l'USTHB. (Alger), Professeur Saâdia BENMAMAR de l'ENP. (Alger) pour avoir accepté de se joindre au jury de la thèse ainsi que pour leurs lectures et corrections minutieuses.

Mes remerciements sont adressés aussi à Monsieur Gerrit R BASSON et Jeanine K VONKEMAN de Université de Stellenbosch, Afrique du Sud, pour leurs collaborations, dont leurs connaissances sur les stratégies de lutte contre l'envasement m'ont été d'une très grande aide.

Je tiens également à remercier Madame TEBBI Fatima Zohra professeur à l'université BATNA pour son aide très fructueuse. Son expérience dans le domaine de l'optimisation de la gestion des barrages, m'a été d'une grande importance pour ma formation.

Mes remerciements vont à toute l'équipe de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts ANBT pour leurs aides précieuses. Mr M. Houglawane ANBT Alger, Mme S. Boudina ANBT Alger, Mr A. Khmouli ANBT Barrage Foug El Gherza, Mr M BOUINOUN ANBT Barrage Boukourdane

*Mr Boudjerda Merouane*

# DEDICACES

*Je dédie ce travail à :*

*Mon Père et ma Mère*

*Mon très cher frère Farouk et sa femme Fouzia*

*Ma chère femme Sihem*

*Mes enfants Mohemmed Mehdi et Asma*

*Toute ma famille et belle famille*

*Tous mes amis Lyes, Youcef, Samir, Jamal, Riad et Mohamed*

*Monsieur Boudjerda Merouane*

# Résumé

La réalisation et la gestion des barrages-réservoirs sont des opérations complexes. Elles nécessitent la considération d'un nombre important de facteurs et contraintes : techniques, économiques, sociales, environnementales et même politiques. La quantité optimale à allouer aux consommateurs peuvent être déduite soit à partir des courbes règles issues des modèles de simulation ou à partir des modèles d'optimisation axés sur différentes techniques d'optimisation développées dans la recherche opérationnelle.

L'importance économique et sociétale du stockage de l'eau fait du problème de l'envasement en retenue un domaine de recherche actif et en expansion. Au fil du temps, les sédiments s'accumulent dans les réservoirs et déplacent le volume de stockage utilisable, ce qui à son tour affecte négativement le rôle pour lesquels sont implantés. Différentes stratégies de lutte contre l'envasement des barrages peuvent être projetées ; que ce soit au niveau du bassin versant ou au niveau de la retenue du barrage d'eau.

Afin de tirer les règles d'exploitation optimales, la technique de l'optimisation par la programmation dynamique déterministe hybridée par les réseaux de neurones (PDDNN) est appliquée, sur quatre barrages en Algérie : Boukourdane (W.Tipaza), Cheffia (W.Taref), Cheurfas II (W.Mascara) et Fom El-Gherza (W.Biskra).

Les résultats de l'optimisation obtenus sont très satisfaisants, puisqu'on a pu améliorer le taux de satisfaction de la demande de 47, 49 et 49% jusqu'à 90, 60 et 70% pour les barrages de Cheffia, Boukourdane et Cheurfas II respectivement. Alors, que pour le barrage de Fom El Gherza, le taux de satisfaction est augmenté à l'ordre de 47%. Ce résultat qui apparaît décevant a été influencé d'une part, par des périodes successives de sécheresses qui a connu la région, et d'autre part, du problème de l'envasement.

La prise en considération de l'influence des deux stratégies de dévasement, le soutirage des courants de densité et le dévasement par dragage, a permis d'offrir plus de lâchers d'eau mensuels aux agriculteurs.

Enfin, l'efficacité des stratégies de l'évacuation des sédiments a été explorée par l'évaluation des indices de performance. En examinant la fiabilité, la résilience et la vulnérabilité, les résultats ont abouti que l'opération de dragage a donné une exploitation plus fiable, résiliente et moins vulnérable par rapport aux autres stratégies.

**Mots clés :** Barrage, Optimisation, PDDNN, Dévasement, Soutirage des courants de densité, Dragage, Indices de performance.

# Abstract

The construction and management of dams-reservoirs are complex operations. They require the consideration of a large number of factors and constraints: technical, economic, social, environmental and even political. The optimal quantity allocated to consumers may be deducted either from the rule curves derived from simulation models, or from the optimization models based on different optimization techniques and developed in operational research.

The economic and societal importance of water storage makes the problem of reservoir siltation an active and expanding subject of research. Over time, sediment accumulates in the reservoirs and displaces the usable storage volume, which in turn negatively affects the role for which is implanted. Different strategies to fight against the siltation of dams can be planned, whether at the level of the catchment area or at the level of the reservoir of the water dam.

In order to derive the optimal operating rules, the technique of optimization by dynamic deterministic programming hybridized by neural networks (PDDNN) is applied to four dams in Algeria : Boukourdane (W.Tipaza), Cheffia (W. Taref), Cheurfas II (W.Mascara) and Foum El-Gherza (W.Biskra).

The optimization results obtained are very satisfactory, since we were able to improve the rate of satisfaction of the request from 47, 49 and 49% up to 90, 60 and 70% for the Cheffia, Boukourdane and Cheurfas II dams respectively. Whereas, for the Foum El Gherza dam, the satisfaction rate is increased to around 47%. This result, which appears disappointing, is influenced, on the one hand, by successive periods of drought in the region and on the other hand by the problem of siltation.

The consideration of the two desilting strategies influence's, venting turbidity currents and dredging desilting, offer more monthly water releases to farmers.

Finally, the effectiveness of sediment removal strategies is explored by evaluating performance indices. By examining the reliability, resilience and vulnerability, the results concluded that the dredging operation resulted in a more reliable, resilient and less vulnerable operation compared to other strategies.

**Key words:** Dam, Optimization, PDDNN, Desilting, Venting turbidity currents, Dredging, Performance indices.

## ملخص

تعتبر عملية إنشاء السدود والخزانات وإدارتها عمليات معقدة فهي تتطلب الاخذ بعين الاعتبار عددا كبيرا من العوامل والقيود: تقنية، اقتصادية، اجتماعية، بيئية و حتى سياسيه. ان كمية المياه المثلى التي يجب تخصيصها للمستهلكين تحدد سواء من منحنيات القواعد المستمدة من نماذج المحاكاة او من نماذج التحسين المختلفة و التي تم تطويرها في البحث التشغيلي.

الاهمية الاقتصادية والاجتماعية لتخزين المياه تجعل من مشكلة الترسبات مجال بحث نشط و متوسع. بمرور الوقت، تتراكم الرواسب في الخزانات و تزيد حجم التخزين القابل للاستغلال، والذي بدوره يؤثر سلبا على الدور الذي انشا من أجله. يمكن وضع مخططات مختلفة من أجل الحد من مشكلة ترسب الطمي في السدود، سواء على مستوى الحوض او على مستوى الخزان

من أجل اشتقاق قواعد التخزين المثلى، تم تطبيق تقنية التحسين عن طريق البرمجة الديناميكية المعروفة و المهجنة بواسطة الشبكات العصبية (PDDNN)، على اربعة سدود في الجزائر: بوكردان (تبيازة)، الشافية(الطارف)، الشرفة2(معسكر) و فم الغرزة (بسكرة)

ان نتائج التحسين المحصل عليها مرضية للغاية، حيث تمكنا من تحسين معدل قبول الطلب من 47, 49, 49 الى 69, 90 و 70.7% للسدود الشافية، بوكردان و الشرفة2 على التوالي. اما بالنسبة لسد فم الغرزة، ارتفعت نسبة القبول الى 47 %. هذه النتيجة مخيبة للآمال، لأنها تأثرت من ناحية بفترات الجفاف المتتالية التي عرفتها المنطقة، و من ناحية أخرى بمشكل الترسبات.

ان الاخذ بعين الاعتبار استراتيجية ازالة الترسبات (خفض كثافة التيار و عملية التجريف) في عملية التحسين، الى زيادة اطلاقات المياه الشهرية المزارعين.

اخيرا، تم فحص استراتيجية ازالة الترسبات من خلال تقييم مؤشرات الاداء، حيث خلصت النتائج إلى أن عملية التجريف كانت أكثر موثوقية، أكثر مرونة و اقل ضعفا مقارنة بالاستراتيجيات الاخرى.

كلمات مفتاحية: السد، تحسين، PDDNN، ازالة الترسبات، خفض كثافة التيار، عملية التجريف، مؤشرات الاداء.

# TABLES DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	i
TABLES DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ANNEXES	107
ANNEXE A Algorithme d'essais particuliers	108
ANNEXE B Présentation de la zone d'étude	109
ANNEXE C Exemple de calcul des lâchers optimaux par la méthode de la programmation dynamique déterministe	130
ANNEXE D Programme de simulation de la gestion d'un barrage par les réseaux de neurones	131
ANNEXE E Exemple de calcul des indices de performance	132

---

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : ETAT DE L'ART SUR LA GESTION DES BARRAGES-RESERVOIRS	
Introduction .....	5
I.1 REGLES DE GESTION DES BARRAGES.....	5
I.2 MODE DE GESTION DES BARRAGES .....	10
I.2.1 Gestion pour des périodes normales et prédéterminées .....	10
I.2.2 Gestion des retenues en période difficile .....	11
I.2.2.1 Gestion des retenues en période de sécheresse .....	11
I.2.2.2 Gestion des barrages en périodes humides .....	11
I.2.2.3 Gestion des crues .....	12
I.3 CONFLITS DANS LA GESTION DES BARRAGES.....	12
I.3.1 Conflits dans l'espace (volume).....	12
I. 3.2 Conflits dans le temps .....	13
I. 3.3 Conflits sur les lâchers .....	13
I.4 GESTION PAR OPTIMISATION DES RESERVES D'UN BARRAGE.....	13
I. 4.1 Optimisation de la gestion des barrages par les méthodes exactes.....	15
I. 4.1.1 Optimisation par programmation linéaire (PL).....	15

I. 4.1.2 Optimisation par programmation dynamique (PD) .....	17
I. 4.2 Optimisation de la gestion des barrages par les méthodes heuristiques.....	20
I.4.2.1 Les algorithmes génétiques.....	20
I. 4.2.2 Optimisation par essaims particulières.....	23
I.4.3 Application des techniques d'intelligence artificielles dans la gestion des barrages...	25
I. 4.3.1 Les réseaux de neurones artificiels .....	26
I. 4.3.2 Technique des neurones flous.....	29
I.5 INFLUENCE DES STRTEGIES DE LA GESTION DES SEDIMENTS SUR L'EXPLOITATION DES BARRAGES .....	31
Conclusion.....	33
Chapitre II : CADRE DE L'ETUDE	
II-1 PRESENTATION DES ZONES D'ETUDE .....	35
II.1.1 Caractéristiques générales des Barrages .....	36
II.1.2 Caractéristiques climatologiques et hydrométriques des barrages .....	37
II.1.2. Barrage de Cheffia.....	37
II.1.2.1 Précipitations .....	37
II.1.2.2 Apports liquides.....	38
II.1. 2. 3 Evaporation.....	39
II.2 GESTION ACTUELLE DES BARRAGES.....	40
II.2.1 Barrage de Boukourdane .....	40
II.2.2 Barrage de Cheffia .....	42
II.2.3 Barrage de Foum El-Gherza.....	44
II.2.4 Barrage de Chorfall.....	45
Conclusion.....	47
Chapitre III : OPTIMISATION DE LA GESTION DES BARRAGES-RESRVOIRS	
Introduction .....	49
III.1.FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME D'OPTIMISATION .....	49
III.2. CHOIX DE LA FONCTION OBJECTIF .....	49
III.3 EVALUATION DES LACHERS ET STOCKS OBJECTIFS .....	51
III.4. SIMULATION DE L'EXPLOITATION DES BARRAGES PAR LES RESEAUX DE NEURONES .....	52
III.5 DISCUSSION DES RESULTATS.....	54
III.5. 1 Résultats de l'optimisation.....	54

III.5. 2 Résultats de la simulation .....	58
III.6 EVALUATION DE LA SATISFACTION DE LA DEMANDE .....	66
 Chapitre IV : STRATEGIES DE LA GESTION DES SEDIMENTS DANS LE BARRAGE DE FOUM EL-GHERZA	
Introduction .....	71
IV.1 ETAT D'ENVASEMENT DES BARRAGE EN ALGERIE .....	71
IV.2 ENVASEMENT DU BARRAGE DE FOUM EL-GHERZA .....	73
IV.2.1 Processus de l'envasement du barrage de Foum El-Gherza .....	73
IV.2.2 Evolution du taux de l'envasement du barrage de Foum El-Gherza.....	74
IV.3 STRATEGIES DE LA GESTION DES SEDIMENTS DU BARRAGE DE FOUM EL-GHERZA .....	75
IV.3.1 Soutirage des courants de densité du barrage de Foum El-Gherza.....	75
IV.3.2 Opérations de dragage dans le barrage de Foum El-Gherza.....	78
 Chapitre V : INFLUENCE DES STRATEGIES DE LA GESTION DES SEDIMENTS SUR L'EXPLOITATION DU BARRAGE DE FOUM EL-GHERZA	
Introduction .....	83
V.1 RESULTATS DE L'OPTIMISATION .....	83
V.1.1 Stockes optima.....	84
V.1.2 Lâchers optima et taux de satisfaction..... ;	88
V. 1.3. Courbes de gestion optimales.....	89
V.2 ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'OPTIMISATION.....	90
V. 2.1. Evénements rencontrés lors de l'exploitation des barrages.....	92
V. 2.2. Fiabilité de la gestion des barrages .....	94
V. 2.3. Evaluation des indices de performance de la gestion du barrage de Foum El-Gherza .....	94
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	97
Références bibliographiques.....	100

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Principales fonctions d'activation utilisées par les neurones formels.....	27
Tableau II.1 Caractéristiques générale des barrages choisis .....	32
Tableau II-2 Précipitations moyennes mensuelles .....	37
Tableau II-3 Apports moyens mensuels .....	38
Tableau I.4 Volumes évaporés moyens mensuels .....	39
Tableau II.5 Besoins mensuels en eau pour le barrage de Boukourdane .....	40
Tableau II.6 Volumes annuels des lâchers à partir du barrage de Boukourdane .....	41
Tableau II.7 Besoins mensuels en eau pour le barrage de Cheffia .....	42
Tableau II.8 Lâchers annuels à partir du barrage de Cheffia.....	43
Tableau II.9 Besoins mensuels pour l'irrigation à partir du barrage de Foum El-Gherza.....	44
Tableau II.10 Lâchers annuels à partir du barrage de Foum El-Gherza.....	44
Tableau II 11 Besoins mensuels en eau pour le barrage de Cheurfas II .....	45
Tableau II.12 Lâchers annuels à partir du barrage de Cheurfas II .....	46
Tableau III.1 Lâchers et stock objectif du barrage de Boukourdane .....	51
Tableau III.2 Lâchers et stock objectif du barrage de Cheffia.....	51
Tableau III.3 Lâchers et stock objectif du barrage de Foum El-Gherza.....	52
Tableau III.4 Lâchers et stock objectif du barrage de Cheurfas II .....	52
Tableau III.5 Les différentes périodes de l'optimisation.....	54
Tableau III.6 Caractéristique statistiques des données de la simulation pour le barrage de Boukourdane .....	59
Tableau III.7 Caractéristique statistiques des données de la simulation pour le barrage de Cheffia.....	59
Tableau III.8 Caractéristique statistiques des données de la simulation pour le barrage de Foum El Gherza.....	60
Tableau III.9 Caractéristique statistiques des données de la simulation pour le barrage de Cheurfas II .....	60
Tableau III.10 Indicateurs de performance des réseaux de neurones pour le barrage de Boukourdane .....	61
Tableau III.11 Indicateurs de performance par les réseaux de neurones pour le barrage de Cheffia.....	62

Tableau III.12 Indicateurs de performance des réseaux de neurones pour le barrage de Foug El-Gherza.....	63
Tableau III.13 Indicateurs de performance des réseaux de neurones pour le barrage de Cheurfas II .....	64
Tableau III.14 Taux de satisfaction par optimisation pour chaque barrage .....	66
Tableau IV.1 Evolution du taux d'envasement des barrages en Algérie .....	72
Tableau IV.2 Taux d'envasement des barrages en Algérie .....	73
Tableau IV.3 Evolution de la quantité de la vase déposée au fond du barrage de Foug El-Gherza .....	75
Tableau IV.4 Volume dévasé par les opérations de dragage dans les barrages Algériens .....	89
Tableau V.1 Indicateurs de performance des meilleurs réseaux de neurone.....	83
Tableau V.2 Evolution des lâchers optimaux et les taux de satisfaction .....	88
Tableau V.3 Indices de performance de satisfaction .....	95

## LISTE DES FIGURES

Figure N°I-01 Zones de fonctionnement d'un barrage-réservoir .....	7
Figure N°I-02 Variation des zones de fonctionnement au cours de l'année .....	8
Figure N°I-03 Stratégies de gestion d'un barrage-réservoir .....	9
Figure N°I-04 Règle de gestion empirique .....	10
Figure N°I-05 Schéma général d'un algorithme génétique .....	21
Figure N°I-06 Structure d'un neurone artificiel .....	26
Figure N°I-07 Structures des réseaux de neurone multicouches .....	27
Figure N°I-08 Réseau ANFIS à deux entrées et une sortie.....	30
Figure N°II-01 Localisation des barrages d'études.....	35
Figure N°III-1 Architecture du réseau de neurone MLP .....	53
Figure N°III-2 Organigramme du programme d'optimisation de la gestion des barrages par la PDDNN.....	55
Figure N°III-3 Stocks optimaux dérivés par la PDDNN.....	57
Figure N°III-4 Relation entre valeurs simulés et optimisés pour les barrages .....	65
Figure N°III-5 Courbe de règle de gestion optimales obtenues par PDDNN .....	68
Figure N°IV-1 Carte de sensibilité à l'envasement des barrages en Algérie .....	71
Figure N°IV-2 Zone de dépôt des particules fines dans la retenue du barrage de Foum El-Gherza .....	74
Figure N°IV-3 Vanne de fond du barrage de Foum El Gherza .....	76
Figure N°IV-4 Volume évacué par la vidange de fond du barrage de Foum El Gherza .....	77
Figure N°IV-5 Opération de dragage du barrage de Foum el Gherza .....	78
Figure N°IV-6 Schéma synoptique d'une opération de dragage dans un barrage .....	79
Figure N°IV-7 Evolution de la capacité de stockage du barrage de Foum El Gherza. ....	80
Figure N°V-1 Volumes des stocks optimaux pour le cas de l'opération de dragage .....	85
Figure N°V-2 Volumes des stocks optimaux pour le cas de l'opération du soutirage des courants de turbidité .....	87
Figure N°V-3 Courbes des gestions optimales dérivées par DPNN .....	90

## INTRODUCTION GENERALE

L'eau ou or bleu, est la base de toute forme de vie. Les ressources hydriques naturelles sont profondément liées aux précipitations. Celles-ci sont inégalement réparties sur le territoire et caractérisées par une irrégularité intra-annuelle et interannuelle. Avec une démographie croissante et les normes de vies dans les pays en voie de développement, la demande en eau est devenue un grand défi pour les responsables et les planificateurs, qui veillent à maintenir le bon équilibre entre les ressources en eau disponibles et leur utilisation.

Le stockage de l'eau de surface est une stratégie centrale pour garantir l'approvisionnement et combler le déficit en périodes de sécheresse. Les barrages-réservoirs sont appelés à jouer aussi bien un rôle d'organe de stockage que de régulateur.

La gestion des barrages figure parmi les sujets fondamentaux du domaine de la planification et de la gestion des ressources en eau. Si le réservoir est construit et sa capacité fixée, il y a forcément, selon les règles adoptées de gestion, divers niveaux de performance selon les déficits ou défaillances dans la satisfaction des besoins en eau. Le gestionnaire est évidemment amené à se poser des questions pratiques concernant l'optimisation d'un prélèvement dans une telle situation. L'ensemble de ces prélèvements sur les stocks suivant une période donnée constitue une "politique" de gestion, qui doit obéir à un compromis optimal entre les différents objectifs. La détermination d'une politique d'exploitation d'un barrage-réservoir pour présenter une gestion efficace de l'eau est un problème complexe, parce qu'elle implique des événements hydrologiques aléatoires. Cette politique spécifie les critères de maintien ou de lâcher l'eau stockée à différents moments de l'année en fonction des apports et des demandes.

Depuis plus de quatre décennies, des recherches intensives, soutenues par la constante croissance des performances des calculateurs, ont été menées sur l'application des modèles d'optimisation pour la gestion des barrages. L'application des techniques d'optimisation du fonctionnement des réservoirs est devenue une préoccupation majeure dans le domaine de la gestion et de la planification des ressources en eau.

L'envasement des barrages est l'un des grands problèmes hydrauliques qui menace les infrastructures hydrotechniques dans de nombreux pays du monde. D'autant plus qu'une fraction considérable des matériaux arrachés, par l'érosion hydrique, se dépose dans les retenues de barrages, ce problème naturel devient inquiétant, surtout lorsque le seuil tolérable est dépassé. Sa complexité pose d'énormes problèmes aux gestionnaires de barrages en réduisant son volume utile disponible, et par suite diminue sa durée de vie.

La maîtrise du phénomène de l'envasement ne peut passer qu'à travers un diagnostic approfondi, qui nous permet de projeter des mesures de protection. Le suivi des stratégies de lutte contre ce phénomène devient indispensable dans le but d'améliorer l'exploitation des ouvrages hydrotechniques.

L'Algérie dispose 80 barrages avec une capacité globale de 7,6 milliards de m<sup>3</sup>. D'importants efforts sont entrepris par les responsables du secteur de l'eau pour répondre à la croissance de la demande, qui s'est multipliée en quatre dans les dernières quarante années.

L'objectif de ce travail est, en premier lieu, d'améliorer la gestion de quatre barrages en Algérie. Ces barrages sont choisis dans différents étages bioclimatiques, à savoir : Boukourdane (W.Tipaza) dans la zone sub-humide, Cheffia (W.Taref) dans la zone humide, Cheurfas II (W.Mascara) dans la zone semi-aride et Foum El-Gherza (W.Biskra) dans la zone aride. Ce dernier est considéré parmi les barrages les plus envasés de l'Algérie. Depuis sa mise en exploitation en 1950, une quantité de 40 millions de m<sup>3</sup> de vase s'est déposée dans la retenue, soit un taux de comblement de 85% de la capacité initiale. Deux stratégies de dévasement ont été opérées à savoir : le soutirage par des courants de densité et le dévasement par dragage.

Le code de calcul dénommé « Programmation Dynamique Déterministe », est retenue comme méthode d'optimisation de la gestion du réservoir. L'algorithme de calcul s'appuie sur la méthode Réseaux de Neurones Artificiels, choisi comme étant un outil de simulation de l'opération du réservoir.

Ainsi, ce travail scindé en cinq chapitres : le premier chapitre porte sur les modes de gestion des barrages-réservoirs. Les différentes techniques appliquées pour optimiser la gestion des barrages, que ce soit traditionnelles ou heuristiques, sont détaillés.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du cadre de l'étude. Les quatre barrages retenus sont présentés, ainsi que leurs états actuels d'exploitation.

Dans le troisième chapitre, la procédure de l'optimisation par la programmation dynamique déterministe hybridée par les réseaux de neurones est expliquée afin de tirer les règles d'exploitation optimales.

Le quatrième chapitre aborde sur les procédés menés par les gestionnaires du barrage de Foum El-Gherza, dans le but d'atténuer les pertes de la réserve du barrage. Lesdits procédés mettent en exergue les méthodes de lutte curatives à savoir les opérations de dragage et l'évacuation des sédiments par le soutirage pour les courants de densité.

Les résultats de l'optimisation de l'exploitation du barrage de Foug El-Gherza en tenant compte de l'influence des stratégies de la gestion des sédiments sont présentés dans le cinquième chapitre. Les indices de performance de l'optimisation sont évalués et l'efficacité des stratégies projetées est examinée. Au final, une conclusion générale ainsi que des recommandations vont ponctuer ce présent travail.

## **CHAPITRE I**

# **ETAT DE L'ART SUR LA GESTION DES BARRAGES- RESERVOIRS**

## Introduction

Les barrages-réservoirs contribuent de manière significative dans la gestion des ressources en eau, dont leur rôle principal est de réguler la réserve utile (zone de fonctionnement). Ils reportent 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). Les objectifs régissant la gestion des barrages-réservoirs sont multiples, à savoir : la satisfaction des diverses demandes d'utilisation de l'eau, la protection contre les crues, la production hydroélectrique, la protection du milieu, la navigation...etc.

La notion de "système" se présente généralement pour désigner les limites de l'objet d'une étude d'amélioration de la gestion des ressources en eau. Mais cette notion englobe aussi la façon subjective d'analyser le fonctionnement d'une unité fonctionnelle. Donc, la connaissance des réactions du système permet d'implanter une méthode de gestion dans le but d'atteindre les objectifs. Un gestionnaire mettra plusieurs années pour acquérir une expérience et finalement obtenir une règle de fonctionnement peu éloignée du point idéal. En plus, des décisions concernant les niveaux de l'eau stockés dans les réservoirs et la quantité de l'eau lâchée peuvent être prises selon les divers buts qui sont présents au cours d'une période d'instant spécifique.

### I.1 REGLES DE GESTION DES BARRAGES

La procédure de "décision" est l'opération qui permet, pour des conditions hydrologiques et économiques fixées, de choisir un lâcher. C'est le choix pris à partir d'un ensemble de solutions alternatives. Elles impliquent des séries d'actions qui se résultent à partir d'une déduction des faits ou d'informations (Wan et *al*, 2011).

Bohanec (2001) a déclaré que la prise de décision se rapporte au processus entier pour faire le choix, qui commence par l'évaluation du problème, le rassemblement de l'information, l'identifiant des solutions de rechange, la prévoyance des conséquences et enfin l'action et l'évaluant les décisions. Les activités principales dans le processus de la prise de décision sont l'identification du problème, la recherche de l'information, l'analyse du problème, l'évaluation de la solution et enfin la décision.

L'information, la connaissance et l'expérience se considèrent comme des nécessités très importantes dans la prise de décision. L'information diverse et la connaissance exigées dans la prise de décision bondissent les limites cognitives du décideur. Ces dernières représentent les limites de couverture de la capacité de l'individu pour résoudre le problème.

D'après les résultats des travaux de Zack (2007), il y a quatre défis importants à relever par le décideur qui sont liés à l'utilisation de l'information et des connaissances dans la prise de décision, à savoir : l'incertitude, la complexité, l'ambiguïté et l'équivocalité.

L'incertitude est causée par l'insuffisance de l'information, un des facteurs importants dans la prise de décision. Le problème de complexité surgit en raison de la surcharge d'information qui occasionne des difficultés au décideur, car elle n'est pas facilement traitée et interprétée. Le manque de la connaissance dans une situation cause le problème d'ambiguïté, occasionnant des difficultés dans l'interprétation de l'information. Ainsi, trop de connaissance peut poser le problème d'équivocalité dû à la contradiction de la connaissance. Concernant l'expérience, et pendant les situations d'urgence, c'est l'un des facteurs les plus influents qui affectent le processus décisionnel, car l'expérience aide les décideurs de choisir la meilleure ligne d'action basée sur la situation à laquelle ils font face.

Dans la pratique, le gestionnaire doit suivre une règle de gestion bien précise pour prendre la bonne décision d'après l'état du système. Une règle de gestion est l'application de l'ensemble des états dans l'ensemble des commandes, c'est-à-dire qu'à tout état du système de réservoirs (niveaux de stocks, conditions hydro climatiques), on fait correspondre une décision (manœuvre des vannes de lâchers.... etc.).

Une règle est basée généralement sur l'analyse séquentielle détaillée de diverses combinaisons critiques des conditions hydrologiques et des besoins en eau. Elle devrait indiquer les niveaux de l'eau dans le barrage et les lâchers pendant différentes périodes de l'année, en incluant les politiques opérationnelles. Young (1967) a présenté pour la première fois une méthode pour obtenir des règles d'exploitation générales à partir des résultats d'une optimisation déterministe. D'après François (2013), la règle de gestion d'un système peut par exemple se traduire par l'utilisation de courbes guides. Ces dernières peuvent prendre des formes différentes selon les problèmes de gestion considérés.

La courbe de guide est le niveau de la cible prévu pour être réalisé dans un réservoir sous différentes conditions des probabilités des apports et/ou des demandes, au cours de diverses périodes en année. C'est une représentation graphique spécifiant le stockage idéal ou l'espace de stockage prévu pour être réalisé dans un réservoir. L'objectif suggéré est que le réservoir peut mieux satisfaire ses buts, pratiquement si le stockage spécifié par les courbes de règle est maintenu dans le réservoir à différentes périodes de temps en année.

Yeh (1985) a rapporté que la plupart des systèmes de réservoirs sont encore exploités sur base des courbes de règle fixes.

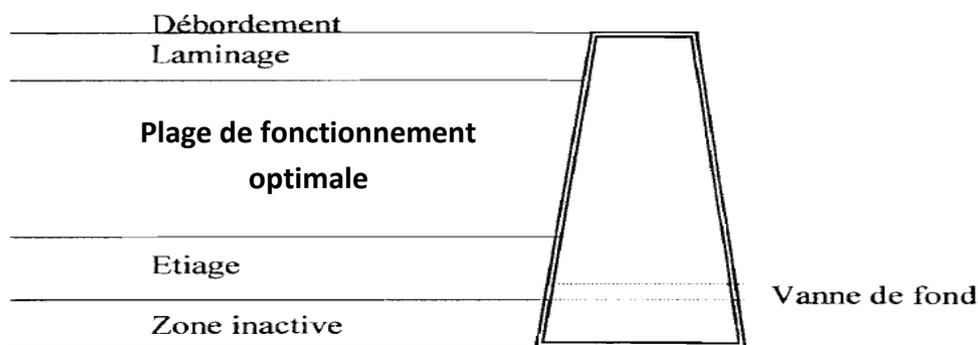
Ces règles sont habituellement présentées sous forme de graphiques ou de tables et guident les lâchers du barrage selon le niveau courant de stockage, des conditions hydrométéorologiques et de la période de l'année. Les exploitants, cependant, appliquent également le jugement personnel pour décider de la valeur à atteindre, cette dernière devient ainsi subjective.

D'après Parent (1991), on distingue trois catégories de règles :

### 1- Règles empiriques par courbe objectif de remplissage :

Cette technique permet au gestionnaire de déterminer, à chaque date donnée, les signatures du stock nécessaire pour répondre aux besoins avec un taux de satisfaction fixé.

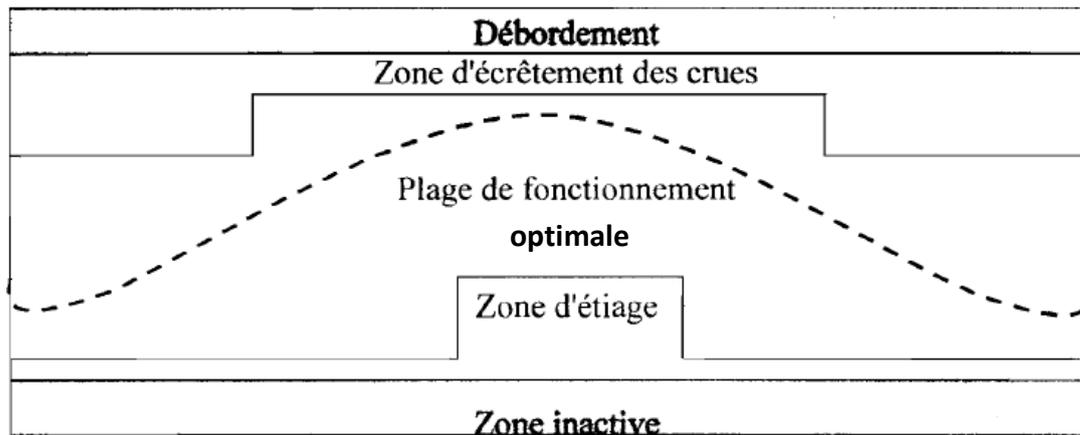
Les niveaux d'eau dans le réservoir et dans les rivières seront contrôlés de façon continue, afin de prendre des décisions par rapport à la situation courante



**Figure I.1** : Zones de fonctionnement d'un barrage-réservoir

La figure n°1, montre les différentes zones contenantes dans un barrage :

- \* une zone de fonctionnement optimale (que l'on suppose satisfaire le meilleur compromis de régulation) où se situe l'état idéal du réservoir et qui permet une certaine marge due aux aléas hydrologiques autour de cet état idéal.
- \* une zone d'écrêtement des crues qui permet de faire face à des crues : il faut alors augmenter le volume des prélèvements. Au-dessus de cette zone, il y a débordement.
- \* une zone de restriction (d'étiage) : si l'on entre dans cette zone, c'est un signal d'alarme pour réduire les lâchers au minimum vital. Des restrictions dans les usages doivent alors être envisagées.
- \* une zone inactive sous le niveau de la prise d'eau accessible ou non par pompage, à utiliser en ultime recours et conservée également pour des raisons écologiques.



**Figure I. 2 :** Variation des zones de fonctionnement au cours de l'année.

D'après la figure N°2, on constate que l'épaisseur des zones de fonctionnement fluctue au cours de l'année, ce qui permet de modéliser des effets tampons plus faibles en périodes critiques

L'objectif du gestionnaire est donc de se rapprocher le plus possible de cette courbe de fonctionnement idéal pour éviter les défaillances et retomber sur les mêmes conditions initiales chaque année.

Tant que l'on se situe dans la zone de fonctionnement normal, l'ouvrage fonctionne en routine, mais dès que l'on sort de cette zone, des mesures exceptionnelles doivent être mises en œuvre. Ce mode de fonctionnement ne permet pas d'intégrer facilement les prévisions hydrologiques, mais cette méthode est souple et robuste en rythme de croisière, du moins dans le cas d'un barrage-réservoir unique. Dans le cas d'un système complexe de barrages réservoirs, se posent rapidement des problèmes de coordination entre les manœuvres de chacune des vannes de commande, la courbe objective est en général calée par simulations.

## 2- Règles linéaires de gestion

Cette stratégie de gestion consiste à choisir un lâcher ( $L$ ) en fonction linéaire du stock dans le réservoir ( $V$ ) et des apports ( $A_p$ ):

$$L(t) = a + b.V(t) + c A_p(t) \quad (I.1)$$

Où :  $a, b$  et  $c$  représentent des constantes périodiques dans le cas de réservoir unique ou des matrices périodiques dans le cas d'un système multi-varié.

On peut déterminer sa stratégie en fonction de la position à l'instant  $t$  dans le plan ( $V, A_p$ ):  
(Figure 3)

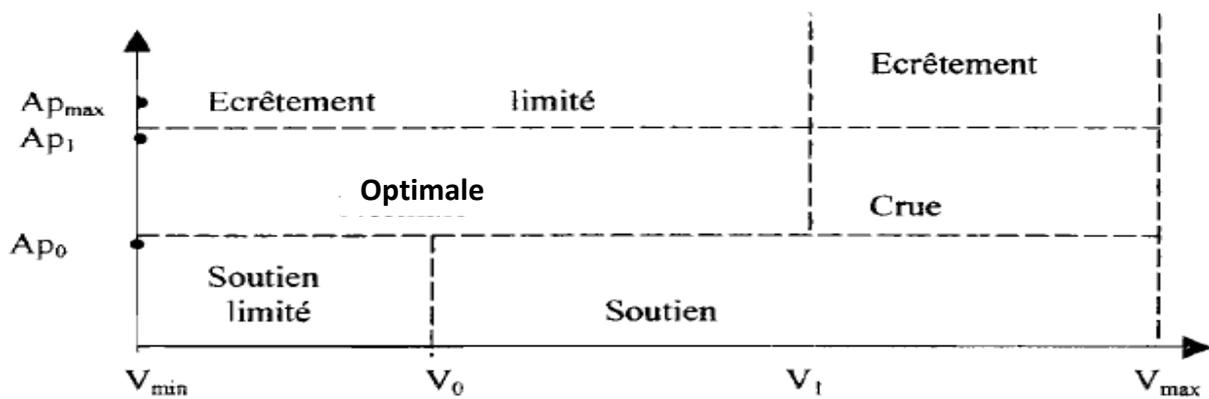


Figure I.3 : Stratégies de gestion d'un barrage-réservoir

**1-stratégie optimale :** on cherche alors à rejoindre le stock objectif en un faible nombre de pas de temps.

**2-stratégie d'écrêtement :** l'apport est très élevé. On décide que  $L(t) = Ap_1 =$  lâcher optimal

**3-stratégie d'écrêtement limité :** l'apport est très élevé mais le stock est déjà grand, il faut alors trouver un compromis entre l'écrêtement et le lâcher maximal :

$$L(t) = \alpha Ap_1 + (1-\alpha) Ap_{\max} \quad (I.2)$$

Avec :  $Ap_{\max}$  correspondant aux potentialités de lâcher maximale de la retenue.

**4-stratégie de crue :** on cherche un compromis entre rejoindre le stock objectif en un faible nombre de pas de temps et une stratégie d'écrêtement.

**5-stratégie de soutien :** apport faible mais stock suffisant. On décide  $L(t)=Ap_0$

**6-stratégie de soutien limité :** apport et stock faible. On décide alors d'un compromis entre une politique de soutien et une politique de restriction afin de retarder le moment où l'on arrivera à  $V_{\min}$ , en espérant qu'il y ait des apports futurs.

### 3- Règles empiriques paramétrées de gestion (LEBDI et al, 1997)

Cette règle traduit le comportement du gestionnaire de la ressource avec la logique suivante :

- Quand le niveau de stock est faible, le gestionnaire sera prudent pour augmenter ou diminuer l'allocation d'eau, selon un schéma par exemple linéaire.
- Pour un stock d'eau variant dans les limites moyennes, le gestionnaire restera encore prudent en apportant un pourcentage de la satisfaction en eau, espérant des apports futurs.
- Pour les stocks d'eau approchant la capacité maximale du barrage, le gestionnaire tend vers une satisfaction totale de la demande avec un souci d'écrêtement de crues. Le schéma est supposé linéaire

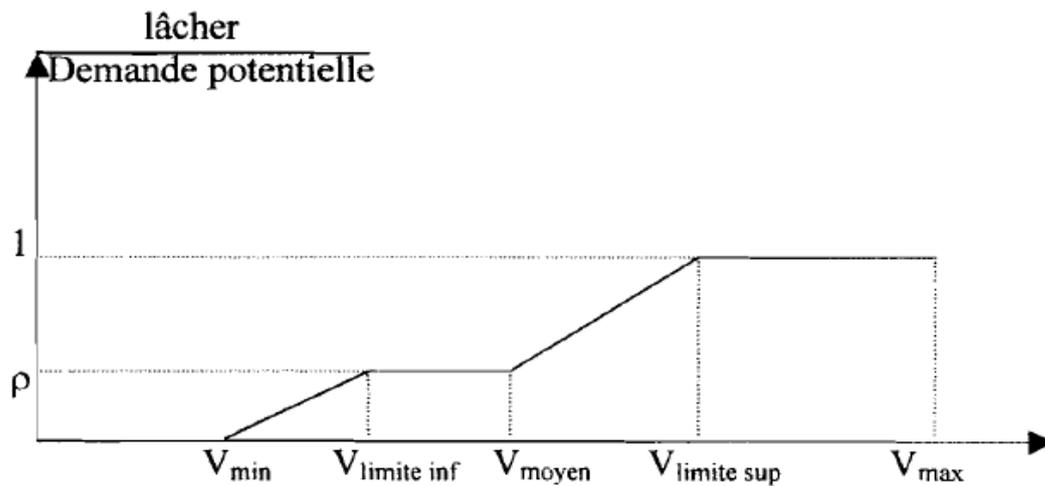


Figure I. 4 : Règle de gestion empirique

Les paramètres de gestion (pente des droites et seuils de la figure ci-dessus) sont déterminés par simulation et/ou reconstitution historique. Ils peuvent être estimés pour différents scénarios (ex : années humides, sèches).

## I. 2 MODES DE GESTION DES BARRAGES

Afin de constituer la base d'informations nécessaires à la gestion, le suivi du bilan hydrique de chaque barrage est une tâche de plus haute importance. Suivant l'échelle temporaire, on peut rencontrer divers modes de gestion :

### I. 2 .1 Gestion pour des périodes normales et prédéterminées

Les volumes d'eau stockés et les apports produits aux divers barrages sont déterminés quotidiennement à travers l'établissement de la situation hydraulique du jour et les bilans hydrauliques. En effet, la situation hydraulique journalière consiste en un support de fiche de suivi journalier.

Le bilan hydrique est établi au début de chaque mois, en comptabilisant les apports, les utilisations, les fuites et les autres pertes engendrées par l'exploitation du barrage en particulier. Les différentes données recueillies à partir des bilans sont utilisées pour faire des simulations, des comparaisons, des études statistiques, hydrologiques...etc.

## **I.2 .2 Gestion des retenues en période difficile**

Les risques d'insuffisance ou d'abondance d'eau, qui sont deux phénomènes courants du climat du pays, nécessitent une gestion intra et inter annuelle permettant la conservation du surplus hydrique pendant les années excédentaires et son utilisation pendant les années de sécheresse. Des modes spécifiques de gestion sont à développer selon les circonstances.

### **I.2 .2 1 Gestion des retenues en période de sécheresse**

Pendant les périodes de sécheresse, la gestion des barrages est repérée depuis le stock résiduel dans les retenues en début d'année hydrologique. A partir des bilans annuels, les services d'exploitation des barrages affichent les stocks disponibles au début de l'année hydrologique. Ces stocks doivent permettre la satisfaction des besoins globaux annuels, tout en gardant un stock de sécurité, ils sont confrontés aux prévisions des besoins des principales utilisations (Eau potable, Irrigation, Industrie, Recharge des nappes ...etc).

Pour garantir la fonction de la régularisation interannuelle, la gestion des barrages tient compte de la mise à disposition, en permanence, du stock de report, pour se prémunir contre les sécheresses prévisibles.

Du cas où les stocks de sécurité ne pourraient pas être assurés dès le début de l'année hydrologique, les besoins de la campagne d'été sont retenus provisoirement et seront maintenus ou diminués en périodes de fortes précipitations selon les apports enregistrés dans les retenues des barrages durant la période.

#### **I.2.2.2 Gestion des barrages en périodes humides (gestion d'abondance)**

Durant les périodes humides, des pertes de volume d'eau importantes peuvent être générées par déversements, et des lâchers non maîtrisés peuvent causer des dégâts importants au niveau des rives. La maîtrise de la gestion des ressources supplémentaires pourrait être un élément de base pour une gestion plus fructueuse des eaux de surface.

Pendant les périodes humides, les probabilités de pluies sont importantes, les températures sont relativement fraîches et les besoins en eau d'irrigation sont relativement réduits. En conséquence, la gestion de la demande est fortement tributaire de la pluviométrie et la gestion des barrages est complètement différente dans ces circonstances de celle suivie en périodes normales. Dans ce cas il est demandé aux services d'exploitation des barrages d'intensifier les opérations de turbinage afin de produire un maximum d'énergie électrique supplémentaire si le barrage est destiné pour la production d'énergie.

### I.2.2.3 Gestion des Crues

Durant la crue, les lâches seront réalisés par l'ouverture des vannes, connues aussi par l'opération de la porte (*gate*). Pour le cas des réservoirs exposés aux crues subites, cette situation présente beaucoup de défis, parce que des décisions importantes doivent être prises sous pression et dans un contexte incertain. Le délai pour la prise de décision est extrêmement court. Les informations disponibles sont généralement rares, et la prévisibilité de la situation hydrométéorologique est très limitée. La signification des décisions de l'opération de porte peut être très importante, depuis que les propriétés en l'aval, les vies humaines ou même le barrage lui-même peuvent être perdus, avec des conséquences désastreuses (Mediero, 2007). Avec l'évolution de l'informatique et la création des outils performants, plusieurs techniques mathématiques ont été développées, dans le cadre de protéger les barrages contre les inondations. Les approches basées sur les techniques d'intelligence artificielle (I.A) semblent être prometteuses pour la gestion des réservoirs en période des crues (Karaboga et al, 2004).

## I.3 CONFLITS DANS LA GESTION DES BARRAGES

Selon les objectifs pour lesquels ils sont réalisés, les barrages-réservoirs peuvent être classés en mono-objectif ou en multi-objectif. L'allocation des ressources en eau et la réponse à la demande en temps réel dépend des facteurs tels que : les disponibilités en ressources naturelles, les capacités de stockage et la politique du fonctionnement de système. Ainsi, les gestionnaires doivent prendre en considération la rareté et les irrégularités des apports d'une part et les besoins ou la demande d'autre part pour satisfaire les consommateurs.

L'exploitation des réservoirs à objectifs multiples, implique un certain nombre d'anomalies dues à la concurrence et l'opposition des objectifs des usages de l'eau, d'où certains conflits.

### I. 3.1 Conflits dans l'espace (volume)

Ces types de conflit se produisent, quand un réservoir exige de satisfaire des buts divergents, par exemple, la conservation de l'eau et la lutte contre les inondations. Un barrage de grande taille peut être construit et le volume de stockage peut être clairement assigné pour chaque but. Cependant, ceci peut ne pas être une proposition économique. Les demandes en eau sont servies de mieux quand le réservoir est autant plein qu'à la fin de la période remplissage. D'une autre part, pour la lutte contre les inondations, l'espace vide dans la zone de laminage doit être maximisé pour absorber sans risque les eaux d'inondation. En raison des objectifs contradictoires, l'exploitation des réservoirs à objectifs multiples est une tâche complexe, particulièrement quand l'exploitation intégrée du système des réservoirs est envisagée

### **I. 3.2 Conflits dans le temps**

Les conflits temporels dans l'exploitation des réservoirs se produisent, quand le mode d'exploitation de l'eau varie avec le but. Les conflits surgissent parce que les lâchers pour un but ne sont pas conformes à celui pour l'autre but. Par exemple les demandes d'irrigation peuvent montrer une seule mode de variation selon les récoltes, tandis que les demandes d'énergie hydroélectrique peuvent avoir une variation différente. Dans de telles situations, le but de dériver une politique de fonctionnement est de résoudre de façon optimale ces conflits

### **I. 3.3 Conflits sur les lâchers**

Les conflits dans les lâchers d'eau quotidiens sont rencontrés généralement dans les réservoirs à objectifs multiples, par exemple, les lâchers de l'eau de consommation et de la génération d'énergie hydroélectrique, peuvent varier considérablement dans le même jour. Pour cela, des petits réservoirs de stockage sont implantés en cheminement aval de la centrale électrique, qui sert à mitiger les fluctuations des déagements pour satisfaire le changement des demandes. (Labadie 2004).

## **I.4 GESTION PAR OPTIMISATION DES RESERVES D'UN BARRAGE**

L'optimisation vient du mot latin "optimum", qui signifie le meilleur. Elle est considérée comme l'une des branches des mathématiques les plus adaptées au développement d'outils pour l'ingénieur. La complexité d'un problème d'optimisation réside sur sa formulation. Il suffit, de formuler clairement l'objectif et les conditions initiales, puis choisir un modèle mathématique apte de résoudre convenablement le problème. De cela, l'optimisation apparait comme un ensemble de techniques permettant de trouver les valeurs des variables qui rendent optimale une fonction de réponse, appelée aussi fonction "objectif". Sur le plan mathématique, cela correspond à la recherche des extrémums de fonctions à plusieurs variables. Donc, l'optimisation représente la formulation d'un programme mathématique dans laquelle un algorithme formel est employé pour calculer un ensemble de valeurs de variables de décision, qui réduise au minimum ou maximum une fonction objectif sous contraintes.

Selon les travaux de Minoux (1983), on peut distinguer les algorithmes selon des caractéristiques : sensibilité ou robustesse, opérateurs de recherche fondamentaux, mode de recherche et ordre de la méthode d'optimisation.

Le contexte de la gestion des ressources en eau est par nature aléatoire. Les phénomènes hydrologiques étant ainsi, les modèles de simulation permettent de juger le choix d'une combinaison quelconque de paramètres mais elle ne donne pas la décision la plus efficace,

nous ne pouvons qu'avoir recours aux techniques d'optimisation. Donc il s'agit d'élaborer la fonction "objectif" à optimiser, d'écrire les contraintes du modèle mathématique et de trouver la règle de gestion optimale au sens de l'objectif fixé. La résolution d'un modèle consiste à utiliser une procédure comme des algorithmes, méthodes ou des techniques (mathématique, statistique ou de simulation), pour déterminer les valeurs de variables représentant l'amplitude de l'utilisation des diverses actions, pour optimiser la fonction économique (atteindre l'objectif), en respectant les contraintes imposées.

Pour un problème d'exploitation de réservoir, les modèles d'optimisation sont formulés en termes de déterminer des valeurs pour un ensemble de variables de décision qui maximisent ou minimisent une fonction objective sous contraintes.

La fonction "objectif" et les contraintes sont représentées par des expressions mathématiques en fonction des variables de décision. Celles-ci sont les taux de lâchers et les volumes de stockage à la fin de la période.

Les contraintes incluent les capacités de stockage et d'autres caractéristiques physiques du système de réservoir, les débits de dégagements pour les différents usages, et la conservation du bilan hydrique. On distingue :

**(i) Contraintes physiques**, qui sont des limitations qui ne peuvent être transgressées, et si elles ne sont pas respectées ; il y aura une défaillance (*failure*) du système. Parmi ces contraintes, on citera par exemple : le volume maximal du barrage ou le débit maximal à la sortie de barrage.

**(ii) Contraintes d'exploitation opérationnelles**, qui ne sont pas des contraintes absolues (imposées). Il n'est pas nécessaire toujours de les respecter lorsqu'il est impossible d'agir autrement ou lorsqu'une défaillance à une période permet d'en éviter de plus importantes à d'autres périodes. Mais le non-respect de ces contraintes engendre une pénalité prise en compte dans la fonction objectif. Cette dernière est comme le cœur du modèle d'optimisation, elle peut être une fonction de pénalité ou de service.

De la littérature, plusieurs études ont été consacrées à traiter des problèmes spécifiques, dont la formulation de la fonction "objectif" est dépendante des objectifs escomptés sous des conditions différentes, on peut citer quelques exemples :

- Maximiser l'énergie de l'hydroélectricité ;
- Maximise les revenus d'approvisionnement en eau et/ou d'énergie hydroélectrique ;
- Maximise les bénéfices nets des exploitations à buts multiples ;
- Maximiser la durée de la navigation ;
- Minimiser les fréquences et/ou les volumes de pénurie ;

- Minimiser le volume de décrues ;
- Minimiser les dommages liés à un événement d'inondation ;
- .....etc.

#### **I. 4.1 Optimisation de la gestion des barrages par les méthodes exactes**

Selon la littérature, de nombreux travaux ont été consacrés à étudier les problèmes d'optimisation de la gestion des eaux des barrages-réservoirs. Yeh (1985) dans la revue de l'état d'art sur les modèles de gestion et d'exploitation des réservoirs, a discuté en détail de l'utilité de divers modèles pour l'exploitation des réservoirs. Labadie (2004) dans la revue de l'état d'art concernant l'exploitation optimale d'un système de réservoirs, a résumé les différents modèles d'optimisation appropriés à un système de réservoirs en tenant compte des caractéristiques : de grand dimensionnel, la dynamique, non linéaire et la stochastique hydrologique.

Plusieurs applications de techniques d'optimisation ont été appliquées dans les études des problèmes de la gestion des ressources en eau, les méthodes d'optimisation comme la programmation dynamique (PD) et la programmation linéaire (PL) sont largement utilisées dans le domaine de l'exploitation des barrages, cela dépend du problème rencontré (comportement des variables et le choix de la fonction objectif).

Le terme programmation dans ce contexte ne réfère pas à la programmation informatique (bien que les ordinateurs soient largement utilisés de nos jours pour résoudre des programmes mathématiques). Il vient de l'usage du mot programme par les forces armées américaines pour établir des horaires de formation et des choix logistiques, que Dantzig<sup>1</sup> étudiait à l'époque. L'emploi du terme programmation avait également un intérêt pour débloquer des crédits en une époque où la planification devenait une priorité des gouvernements. L'expression programmation mathématique tend à être abandonnée.

##### **I. 4.1.1 Optimisation par programmation linéaire (PL)**

C'est la méthode la plus simple et la plus utilisée dans les problèmes de l'exploitation des barrages. Le principe de cette méthode est que les relations entre les variables, dans la fonction à optimiser et dans les contraintes, sont linéaires.

(1) Dantzig est le premier qui fut introduit le terme de la programmation linéaire.

Cette méthode admet un très grand nombre de variables décisionnelles, la solution initiale n'est pas demandée et qui gère des systèmes de ressources avec des problèmes à grande échelle et assez complexes. Son avantage principal réside dans la disponibilité des algorithmes généraux de solution comme le simplexe. Alors que son inconvénient reste dans le cas où le problème exposé exige une fonction économique ou conditionnée par des relations non linéaires.

Dorfmann (1962) était le premier à appliquer cette méthode dans l'optimisation de la gestion des barrages. Young (1967) a proposé l'utilisation de la régression linéaire pour trouver les règles opérationnelles optimales tirées à partir de la méthode d'une optimisation déterministe. De la littérature, on peut citer les études qui sont appliquées cette méthode, Re Velle (1969) ; Bossard (1989); Bellostas(1981); Roefs et Bodin (1970); Pereira et Pinto (1985).

Hiew et *al* (1989) ont appliqué la méthode d'optimisation stochastique implicite en utilisant la programmation linéaire dans le cas du système de réservoir de Colorado (USA). Pour intégrer les courbes de règle optimales, il a employé une série historique de 30 ans des apports mensuels irréguliers, avec 12.613 variables et 5.040 contraintes.

Dandy et Crawley (1992) ont modélisé l'exploitation d'un système de réservoir à objectifs multiples par la programmation linéaire, pour identifier les politiques qui réduisent au minimum les coûts de système au total.

Labadi (2004) a rapporté, que dans certains cas, la taille du problème puisse devenir excessive, alors, la technique des approximations linéaires par discrétisation (*piecewise*) pour le cas des fonctions non linéaires est souvent employée dans les applications par programmation séparable. Elles sont résolues avec des prolongements de la méthode simplex. Les fonctions contenant plus d'une variable peuvent être approximatives par la méthode d'interpolation multilinéaire avec une grille multidimensionnelle. Pour les problèmes de minimisation, ces fonctions doivent être convexes ; sinon, plus de temps sera pris dans les algorithmes de simplex à base d'entrée restreint, ce qui ne garantit pas la convergence à optimal global. (*Restricted basis entry simplex algorithms*)

### I. 4.1.2 Optimisation par programmation dynamique (PD)

C'est une méthode d'optimisation qui permet de traiter des problèmes complexes (non-linéaire), en les décomposant en plusieurs étapes ou périodes. Chaque étape comprend un certain nombre d'états à partir desquelles on trouve la politique optimale.

D'après Wurbes (1993), les modèles de la programmation dynamique ont les caractéristiques suivantes :

- Le problème est divisé en étapes avec une décision exigée à chaque étape. Les étapes peuvent représenter différents points dans le temps (exemple : la détermination des lâchers pour chaque intervalle de temps), dans l'espace (exemple, les lâchers de différents réservoirs), ou différentes activités (telles que des lâchers pour différents utilisateurs de l'eau).
- Chaque étape du problème doit avoir un nombre défini d'états liés à elle. Les états décrivent les conditions possibles dans lesquelles le système pourrait être à cette étape des calculs. La quantité de l'eau dans le réservoir est un exemple d'une variable d'état typique.
- L'effet d'une décision à chaque étape du problème est de transformer l'état actuel du système en un état associé avec la prochaine étape. Si la variable de décision est de combien à libérer l'eau dans le réservoir à l'heure actuelle, cette décision transformera la quantité de l'eau stockée dans le réservoir (variable d'état) de la quantité courante en une nouvelle quantité pour la prochaine étape (période de temps).
- Une fonction de retour indiquant l'utilité ou le coût de la transformation est associée à chaque transformation d'état potentielle. La fonction de retour permet à la fonction “*objectif*” d'être représentée par des étapes.
- L'optimalité de la décision exigée à l'étape courante est jugée en termes de son impact sur la fonction de retour pour l'étape courante et pour toutes les étapes suivantes.

L'optimisation par la programmation dynamique a pris elle aussi sa part dans la littérature. Karamouz et Houck (1982) ont proposé un modèle basé sur la programmation dynamique. Ils ont également employé une méthode itérative dans laquelle des lâchers à partir de la programmation dynamique ont été progressivement contraints pour être proches des valeurs de la règle de fonctionnement. Kangrang et *al* (2009) ont rapporté que la d'optimisation appliquée aux problèmes non linéaires dans la gestion des ressources en eau. Malheureusement, l'application de cette méthode au système de réservoirs multiples est limitée, due au problème de dimension.

De diverses modifications ont été effectuées sur la formulation originale de cette technique pour alléger la malédiction du problème de dimension. Celles-ci incluent : la programmation dynamique par des approximations successives (DPSA) et la programmation dynamique incrémentielle (IDP) ou la programmation dynamique différentielle discrète (DDDP).

Karamouz *et al* (1992) ont appliqué la méthode de la programmation dynamique discrète à un système multiple de réservoirs dans le bassin fluvial de Baltimore. Pour surmonter les difficultés dans les multiples analyses de régression quand les coefficients de corrélation sont Faibles, des solutions successives sont limitées pour être dans un certain pourcentage des règles d'exploitation optimale trouvée dans la précédente technique de programmation stochastique implicite ISP, et dans chaque itération successive, les coefficients de corrélation pour les règles d'exploitation augmentent jusqu'à ce que le processus se termine avec à règles d'exploitation conformées. Selon la représentation de la séquence des apports naturels et la demande, on distingue deux approches de résolution du problème qui sont les cas déterministes et stochastiques.

#### **a. Programmation dynamique déterministe**

Tandis qu'il y a toujours une quantité significative d'incertitude dans n'importe quel système hydrologique, l'analyse préliminaire des solutions peut être faite en utilisant les modèles déterministes. Ces derniers ne considèrent pas explicitement l'incertitude dans des variables hydrologiques. Pour le cas déterministe, la séquence des apports naturels ainsi que la demande en eau sont supposées connues. Celeste and Billib (2009)

Cette hypothèse simplifie considérablement le problème, la solution n'est optimale que pour la séquence utilisée et les apports réels peuvent s'en écarter d'une manière significative. L'avantage de cette procédure est qu'elle permet de ne pas fixer à priori un état à atteindre et d'initialiser arbitrairement la valeur numérique des bénéfices produit par un prélèvement associé à chaque état à la période terminale.

#### **b. Programmation dynamique stochastique (PDS)**

La technique de la programmation dynamique stochastique (PDS), est fréquemment employée dans l'optimisation des règles de gestion, puis une simulation des résultats obtenue avec les données historiques est exigée afin de déterminer l'espace des incertitudes dans le système de fonctionnement.

Si la condition d'application d'une telle optimisation est que la fonction d'évolution soit linéaire, alors dans le cas de la PDS, la fonction objectif est doit bien tenir en compte le problème de l'apport qui est un événement incertain (variables stochastiques).

Le principe de cette méthode est le même que la programmation dynamique déterministe, l'incertitude hydrologique est incorporée dans le modèle par différents intervalles d'apports naturels dont la probabilité d'apparition est connue. Le processus d'optimisation par la PDS est basé sur une équation réursive (*Backward*) permettant d'optimiser le critère de performance en tenant compte des aléas des apports. On la qualifie de "réursive" car l'itération se fait par temps décompté. Cette relation est aussi appelée équation de Bellman-Masse à qui l'on doit les premiers travaux en 1957 (eqt.1).

La valeur de Bellman-Massé à un instant donné permet d'en déduire sa valeur au pas de temps précédent ainsi que le meilleur lâcher correspondant. La prise en compte d'un apport aléatoire relève d'une gestion en avenir incertain. Pour contourner ce biais, on utilise l'espérance mathématique des apports. De plus, cette méthode raisonne en temps décroissant, ce qui permet de faire une gestion en fonction du futur. En revanche, et contrairement aux méthodes déterministes, cette méthode appliquée telle qu'elle, ne tient pas compte des événements passés.

$$f_v(t, T) = \max \text{ ou } \min \left\{ C_{v_t \rightarrow v_{t+1}} + \sum P_j \times f_{v_f}(t+1, T) \right\} \quad (I.3)$$

Cette méthode est basée sur des "coûts" déduits du critère d'optimisation :

$C_{(V_t-V_{t+1})}$  correspond au coût de transition entre l'état du stock  $V_t$  initial et  $V_{t+1}$  final.

$f_{v_f}(t+1, T)$  correspond au coût des transitions pour les pas de temps venir (en fonctionnant en pas de temps décroissant, on commence par calculer les coûts ultérieurs). Pour tenir compte de l'aléa des apports, on choisit encore une fois l'espérance mathématique.

Cette méthode est fréquemment utilisée dont plusieurs auteurs ont appliqué la technique de la PDS pour construire des règles d'exploitations plus fiables. Karamouz et Houck (1987) ont comparé la programmation dynamique déterministe par la régression (DPR) avec la programmation dynamique stochastique (SDP), et conclu que pour de petits réservoirs, l'application de la SDP (avec une capacité de 20% de l'écoulement moyen annuel) est meilleure que celle de la DPR. En revanche, la DPR apparaît mieux pour le cas de grands réservoirs (avec une capacité dépassant les 50% de l'écoulement moyen annuel). Vedula et Mujumdar (1992) ont développé un modèle pour obtenir une politique d'exploitation optimale d'un réservoir destiné à l'irrigation de plusieurs récoltes, avec la stochasticité des apports et des demandes en eau pour les récoltes. Ils ont appliqué la programmation dynamique pour

attribuer d'une façon optimale l'eau disponible pour toutes les récoltes au cours d'une période donnée. Aussi, ils ont évalué l'exécution du système en utilisant la programmation dynamique stochastique pour optimiser les bénéfices sur une année complète.

Vedula et Kumar (1996) ont développé un modèle amélioré en utilisant une approche de la programmation linéaire avec la programmation dynamique stochastique. Ils ont considéré que l'équilibre de l'humidité du sol est différent pour chaque récolte en traitant les précipitations dans le secteur irrigué comme stochastique pour obtenir l'exploitation optimale du réservoir destiné à l'irrigation de plusieurs récoltes.

Dans le cadre de l'évaluation de la fiabilité de la politique de gestion du barrage Ghézala Tunisie (à objectif seul), Mathlouthi (2008) a rapporté que la méthode de la programmation dynamique stochastique implicite par événements secs mène à l'optimum. Et avec l'appui du résultat de l'analyse de fiabilité par rapport à chaque alternative de solution, la capacité du décideur de gestion des barrages à prendre la décision finale sera augmentée.

#### **I. 4.2 Optimisation de la gestion des barrages par les méthodes heuristiques**

Les méthodes heuristiques représentent une nouvelle génération de méthodes d'optimisation approchées puissantes et générales, adaptables et applicables à une large classe de problèmes. Elles sont souvent inspirées des systèmes naturels, soient pris en physique, en biologie de l'évolution ou encore en éthologie. Ce sont des méthodes stochastiques itératives, qui échappent aux minima locaux et progressent vers un optimum global d'une fonction. Elles permettent de fournir des solutions réalisables de bonne qualité en temps raisonnable.

##### **I. 4.2.1. Algorithmes génétiques**

Les algorithmes génétiques se considèrent parmi les classes appartenant aux algorithmes évolutionnaires. Ce sont des algorithmes de recherche basés sur le processus Darwinien de sélection naturelle. Ils sont inventés par Holland (1975) et émergés comme une approche d'optimisation puissante dans les vingt dernières années. Une excellente introduction aux algorithmes génétiques est donnée par Goldberg (1989). En plus, plusieurs chercheurs ont récapitulé les bases de la modélisation par les algorithmes génétique et appliqué cette technique pour résoudre les problèmes non-linéaires, de grande dimension et avec des contraintes.

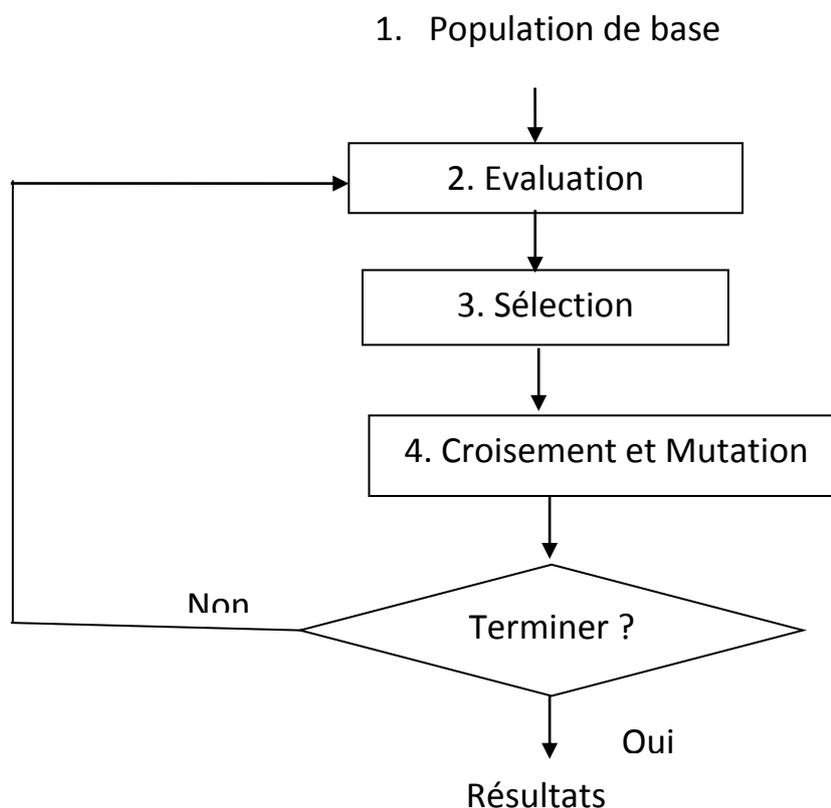
Le principe de cette méthode d'optimisation combinatoire est de chercher des solutions optimales par analogie entre l'optimisation et la sélection naturelle. Dans un milieu naturel, les espèces s'adaptent à leur cadre de vie qui peut évoluer, les individus de chaque espèce se

reproduisent, créant ainsi de nouveaux individus, certains subissent des modifications de leur ADN, certains disparaissent.

Un algorithme génétique va reproduire ce modèle d'évolution dans le but de trouver des solutions pour un problème donné. L'analogie avec la nature est établie par la création d'un ensemble (ou une liste) de solutions (candidats) qui sont la population. Chaque élément dans cette population (individu) est représenté par un ensemble de paramètres qui décrivent complètement la solution, ils sont codés dans des chromosomes (la solution possible du problème) est subdivisée en gènes.

L'algorithme génétique commence par un individu initial (parent) généré d'une manière aléatoire des chromosomes, en respectant les contraintes du problème (Elferchichi et *al*, 2009). Par la suite d'autres nouveaux individus seront générés et évalués par des mécanismes probabilistiques, aléatoires et itératives.

Les individus utilisés par un opérateur sont appelés les parents ; et ceux obtenus en sortie sont les descendants (enfants).



**Figure I.5** Schéma général d'un algorithme génétique

La méthodologie des algorithmes génétiques (Fig I.5) implique :

- **le codage** : binaire ou réel.
- **la fonction d'adaptation** : (*fitness function*) ou fonction d'évaluation, c'est la fonction permettant d'évaluer l'adaptation d'un individu ;

- **les opérations** :

**1- de reproduction** : la génération successive de nouvelles populations par succession d'itérations

**2- de croisement** : ou de recombinaison, c'est la combinaison de deux individus pour engendrer un ou deux nouveaux individus

**3- la mutation** : c'est la modification aléatoire d'un individu

De la littérature, on peut noter que cette technique a été appliquée pour optimiser la gestion des barrages. Ses résultats sont comparés avec ceux obtenus dans les travaux faits auparavant où les méthodes d'optimisation classiques étaient appliquées par : Oliveira et Loucks (1997), Sharif et Wardlaw (2000), Chang et Yang (2002), Kuo et *al.*, (2000), Chen (2003), Celeste et *al.*, (2004), Chang et *al.*, (2005) et Kangrang et Chaleeraktragoon, (2007).

Kumar et *al* (2006) ont mentionné que les avantages de cette technique sont les suivants :

- Utilise le codage de tout l'ensemble de paramètres mais pas entre les paramètres.
- la recherche de la solution se fait pour tous les points de la population et pas uniquement pour un seul point.
- Utilise l'information de la fonction objectif elle-même sans aucune dérivation.
- Les règles de transitions sont probabilistes et pas déterministes.

Un inconvénient de cette méthode est la difficulté dans les calculs explicitement dans les problèmes avec des contraintes (particulièrement les contraintes d'inégalité), aussi dans le maintien des solutions faisables de la population. Les contraintes sont tenues en compte généralement d'une manière indirecte par l'utilisation des termes de pénalité incorporés dans la fonction 'objectif', (Labadi, 2004).

Oliveira et Loucks (1997) ont proposé une approche en utilisant l'algorithme génétique pour définir des politiques d'exploitation d'un barrage-réservoir à usages multiples en utilisant les courbes de règle du système et les fonctions d'équilibrage de la cible individuelle de stockage. Sharif et Wardlaw (2000) ont fait une application des algorithmes génétiques pour une optimisation directe des lâchers en période d'enregistrement comme une alternative de l'approche par optimisation déterministe (DDDP).

Cai et *al* (2001) ont décrit une application d'algorithme génétique pour résoudre un problème, non linéaire et à grande échelle, de gestion d'eau en périodes multiples.

Ahmed *et al* (2005) ont développé un modèle d'algorithme génétique pour dériver la politique optimale d'exploitation pour un réservoir à usages multiples, et comparé sa performance à celle tirée de la programmation dynamique stochastique (SDP). La fonction 'objectif' dans les deux techniques était de réduire au minimum le carré des déviations des lâchers pour l'irrigation. L'analyse de sensibilité a été effectuée pour la mutation et le croisement. Ils ont constaté que les lâchers désignés par le modèle de l'algorithme génétique et plus près à la demande exigée et conclu que cette méthode est plus avantageuse que celle de la SDP.

Kumar et *al* (2006) ont proposé un algorithme génétique pour obtenir une politique optimale d'exploitation et pour l'attribution d'eau d'irrigation du barrage de Karnataka (Inde), dont la fonction objectif était de maximiser la somme des rendements relatifs de toutes les récoltes dans le secteur irrigué. Ils ont pris comme résultat que la politique optimale d'exploitation obtenue en utilisant l'algorithme génétique est semblable à celui obtenue par l'application de la programmation linéaire.

Mathur et Nikam (2009) ont appliqué un algorithme génétique dans l'optimisation de gestion du barrage de Maharashtra (Inde), et pour tirer les règles d'exploitation optimales, ils ont pris comme fonction d'adaptation la minimisation du carré de l'écart des besoins en eaux mensuelles pour l'irrigation avec le carré de l'écart dans l'équation du bilan hydrique.

Shirangi et *al* (2008) ont développé un algorithme en combinant deux modèles d'optimisation. Le premier est l'algorithme génétique pour le contrôle des lâchers du barrage qui est d'objectifs multiples et le deuxième de simulation de qualité de l'eau pour déterminer une courbe de différence entre les objectifs liés à la quantité assignée de l'eau et la qualité. Ils ont prolongé le travail fait par Kerachian et Karamouz (2005) en décomposant le problème principal d'optimisation de long terme à plusieurs modèles d'optimisation annuels.

#### **I . 4.2.2. Optimisation par essais particuliers**

L'optimisation par Essaim de Particules est une méta-heuristique d'optimisation proposée en 1995 par Russel Eberhart et James Kennedy. Elle s'inspire fortement de l'observation des relations grégaires d'oiseaux migrateurs, qui pour parcourir de longues distances (migration, quête de nourriture, parades aériennes, etc.), doivent optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, de temps,....etc.

Un essaim est composé de plusieurs particules, sa taille peut être dynamique : si aucune particule de l'essaim n'améliore la solution, on peut en générer d'autres et on peut également en supprimer. Chaque particule  $i$  est caractérisée par sa position  $x_i$  et un vecteur de changement de position (appelé vitesse)  $v_i$ . A chaque itération, la particule se déplace :

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \times \Delta t \quad (I.4)$$

Et la vitesse est mise à jour par l'équation :

$$v_i^{t+1} = c_i v_i^t + c_p (p_i^t - x_i^t) + c_g (g_i^t - x_i^t) \quad (I.5)$$

avec,  $p_i$  et  $g$  respectivement, la position de la meilleure voisine de  $i$  et la position de la meilleure particule du groupe.  $c_i$ ,  $c_p$  et  $c_g$ : des nombres aléatoires (coefficients de confiance) distribués uniformément dans  $[0,1]$ . Ils dénotent des coefficients d'accélération de la particule  $i$ , ses voisines et de la meilleure particule du groupe.

Considérant la vitesse de recherche des particules, la PSO mis en jour leur position, leur degré de connaissance et ce de la population. Une particule trouve la solution optimale attire à elle-même le reste de la population, jusqu'à toute la population trouve la même solution.

Les étapes l'algorithme de la PSO sont récapitulées dans l'annexe A.

Dans le domaine des ressources en eau, l'algorithme PSO est de plus en plus utilisé dans l'estimation des paramètres pour les modèles hydrologiques (Gill et al, 2006), les prévisions hydrologiques (Chau 2007, Meraji 2006, Wang et al, 2013) et la planification de l'approvisionnement en eau. (Montalvo 2008, A.Sedkin 2012, Spiliotis 2014)

Chau (2004) a appliqué un algorithme de PSO dans l'étape de l'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels afin de prédire les niveaux d'eau en temps réel dans la rivière Shing Mun de Hong Kong.

Meraji et al. (2006) ont développé un algorithme PSO et l'ont testé contre certaines fonctions de référence et l'exploitation optimale du réservoir Dez en Iran.

Kumar et Reddy (2007) ont proposé une technique d'optimisation de l'essaimage de particules (EMPSO) en employant des particules mutées par élitisme, appliquée pour l'élaboration d'un modèle opérationnel de court terme afin d'optimiser les lâchers pour irriguer de cultures multiples, ils ont conclu que cette technique pourrait produire de meilleures solutions par rapport aux algorithmes génétiques ou un algorithme de PSO standard.

Cependant, les études sur l'application de PSO à l'optimisation de la gestion des barrages sont relativement peu nombreuses.

SaberChenari et *al* (2016) ont employé un algorithme de PSO pour trouver des solutions optimales à des problèmes multi-objectifs, cet algorithme a été testé pour le cas d'un système de réservoir à trois usages multiples, ils ont abouti à des résultats intéressants. Ils ont conclu que le modèle PSO a révélé une bonne performance pour minimiser la perte d'eau du réservoir

### **I. 4.3 Application des techniques d'intelligence artificielles dans la gestion des barrages**

Traditionnellement, les techniques d'optimisations, citées au précédent, sont largement appliquées pour tirer les politiques et les règles d'exploitation d'un barrage. Le choix d'une telle méthode de solution est basé sur la nature, la taille du problème et même sur les résultats escomptés. Sur ce sujet, Pinthong et *al.* (2008) ont rapporté qu'une technique d'optimisation fournisse un arrangement optimal qui maximiserait les avantages économiques comme stipulé dans beaucoup de travaux. Il est bien de comprendre que les courbes de règle dérivées par l'application de ces méthodes ont été implantées d'une manière présumée.

Mathlouthi (2008) a conclu lui aussi, que malgré le développement de la technologie informatique et la possibilité d'appliquer des procédures mathématiques plus complexes aux analyses de fonctionnement et d'exploitation des réservoirs, la planification et la gestion quotidienne des systèmes de réservoirs ne bénéficient pas forcément des méthodes les plus originales d'analyse et de simulation des systèmes, ni des optimisations les plus efficaces.

De ce contexte, plusieurs chercheurs dans le domaine de la gestion des ressources ont remarqué que l'application pratique des méthodes d'analyses des systèmes nécessite des modèles plus transparents et moins complexes (Fayaed et *al.*, 2013). Ceci devrait permettre aux utilisateurs finaux de mieux comprendre les modèles et, par conséquent, de les utiliser d'une manière plus efficace et bénéfique.

Labadie (2004) a précisé qu'il est difficile de prendre une décision sur des politiques d'exploitation, particulièrement sous un scénario d'incertitude, cela est dû à l'aspect aléatoire des phénomènes naturels. Cependant, ceci peut être résolu par l'application d'autres approches plus réalistes et avantageuses. Pour cela, des problèmes d'optimisation, avec de calculs très complexes, due à un nombre élevé de variables de décision et de comportement non linéaire, peuvent être résolus avec l'utilisation des algorithmes basés sur des techniques d'intelligence artificielle (AI), telles que les réseaux de neurones artificiels (ANN) et la logique floue (FL).

### I. 4.3.1. Les réseaux de neurones artificiels

Un réseau de neurone artificiel se compose d'un certain nombre d'éléments de calcul qui sont reliés et arrangés dans un certain nombre de couches (les neurones). Le traitement de l'information dans un réseau de neurones se produit par l'interaction entre ces neurones.

Les réseaux de neurones s'appuient sur l'architecture des réseaux neuronaux biologiques constituant le cerveau humain afin de recréer son comportement intelligent. La connexion entre chaque paire de neurones s'appelle un lien, elle est associée à un poids qui détermine l'évaluation numérique de la force de connexion. La figure I.6 présente la structure d'un neurone artificiel.

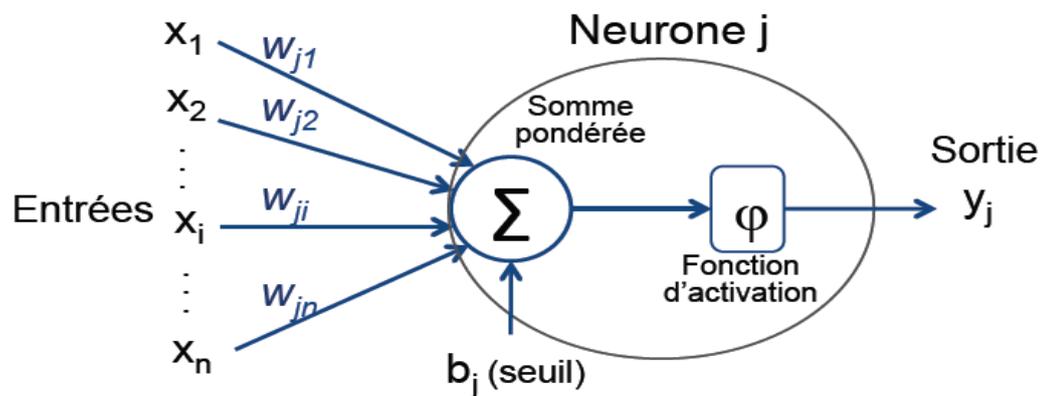


Figure I.6 Structure d'un neurone artificiel (Safae, 2016)

Chaque neurone  $j$  du réseau est un élément processeur, il reçoit des valeurs en entrée  $x_i$  associées à des poids  $w_{ji}$  représentant l'importance de ces entrées. Il renvoie une valeur unique comme sortie, qui peut être envoyée à plusieurs neurones en aval. Une fonction de combinaison calcule le potentiel  $a_j$  du neurone qui est la somme pondérée des entrées et leurs poids à laquelle se rajoute le seuil

$$a_j = b_j + \sum_{i=0}^{n-1} w_{ji} \times x_i \quad (\text{I.6})$$

Une seconde fonction  $\phi$  appelée fonction d'activation ou fonction de transfert est appliquée à ce potentiel pour générer la valeur en sortie  $y_j$ . Elle définit la valeur de sortie d'un neurone en termes des niveaux d'activité de ses entrées. Les fonctions d'activations les plus utilisées sont mentionnées dans le tableau I.1 :

Tableau.I.1 : Principales fonctions d'activation utilisées par les neurones formels.

Nom de la fonction	Formulation mathématique
Linéaire	$a = n$
Seuil	$a = \begin{cases} +1 & \text{si } n > n_1 \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$
Sigmoïde	$a = \frac{e^{kn} - 1}{e^{kn} + 1}$
Tangente hyperbolique	$a = \frac{1 - e^{-2n}}{1 + e^{-2n}}$
Fonction de base radiale	$a = e^{-n^2/\beta^2}$

Dans le cas de perceptron multicouches, les neurones sont organisés par couches. L'information en entrée se transmet par couche successive, pour finalement obtenir le résultat en sortie. Dans cette topologie, les neurones sont divisés en trois classes : les neurones d'entrée, les neurones cachés et les neurones de sortie (les neurones cachés étant situés entre les neurones d'entrée et ceux de sortie).

Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante (excepté pour les couches d'entrée et de sortie) et il n'y a pas de connexions entre les cellules d'une même couche (Figure I.7).

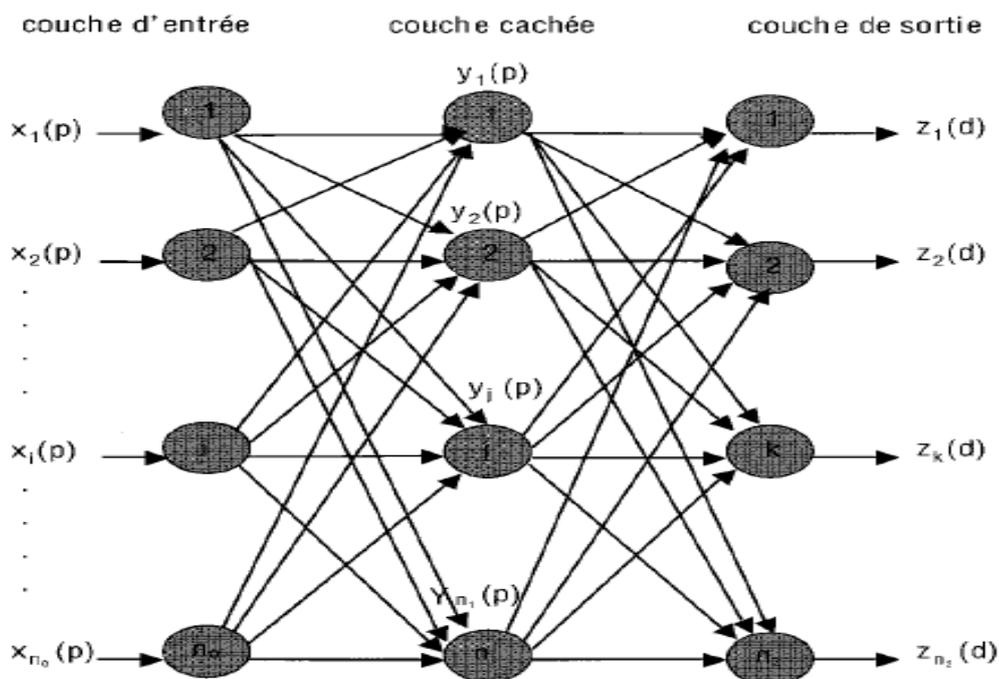


Figure 1.7 Structures des réseaux de neurone multicouches (Dechemi, 2003).

Le réseau de neurone accompli deux fonctions importantes qui sont l'apprentissage et la validation. L'apprentissage est le processus d'adapter les poids de connexion ou la structure dans un réseau de neurone pour produire la sortie désirée en réponse à une stimulation. La validation est le processus d'accepter une entrée stimulée et de produire une réponse de sortie conformément au poids de la structure du réseau.

L'algorithme de rétro-propagation d'apprentissage (BPL) est parmi les algorithmes connus et employés pour former un réseau de neurones. Cet algorithme est appliqué dans un réseau de multicouches de réaction avec des fonctions d'activation différentiables.

L'efficacité de la fonction de base radiale d'un réseau de neurone artificiel a été explorée par Sudheer et Jain (2003), qui a mentionné que selon la disponibilité de données, ces derniers sont subdivisés en deux ensembles de traitement et d'évaluation. Un ensemble de données est employé pour traiter le réseau ou déterminer les poids d'interconnexion de tel que la réponse du réseau de neurone soit assortit clairement avec le comportement observé du processus qu'on doit modeler. Durant l'étape du traitement, le carrée d'erreur moyenne (MSE) et le coefficient de corrélation seront contrôlés afin de trouver le point d'arrêt optimal pour le traitement. Par la suite, le réseau est examiné avec l'ensemble des données de test pour déterminer comment le réseau peut simuler exactement la fonction d'entrée-sortie. Si la performance du réseau de neurones avec les données de test est satisfaisante, le réseau est considéré traité, et les poids seront fixés et employés dans l'application.

Récemment, les réseaux de neurones artificiels (ANN) ont été considérés comme un outil potentiellement utile pour modeler les systèmes non linéaires complexes, ils sont employés souvent dans les études de prévisions.

Dans le domaine de l'exploitation des barrages, les réseaux de neurones artificiels ne sont pas classés avec celles d'optimisation, mais ils peuvent être utiles comme des alternatives efficaces dans l'analyse de régression multiple afin de déterminer des règles d'exploitation optimales en appliquant la méthode d'optimisation stochastique implicite (ISO). Un réseau de neurone artificiel est considéré comme un paradigme de calculé basé sur le fonctionnement du cerveau. Les neurones artificiels ou les nœuds sont des unités de traitement simples qui produisent des sorties à partir des fonctions non linéaires des sommes d'entrées pesées de ce nœud. Labadi (2004). Peu de travaux ont appliqué cette technique seule, et généralement elle est combinée avec la théorie d'ensemble floue. (Raman et Chandramouli (1996), Cancelliere et al (2002), Chandramouli et Deka (2005), Safayat (2015) et Ehsani et al (2016)).

Raman et Chandramouli (1996) ont employé un réseau de neurones artificiel pour déduire des règles de lâchers optimales conditionnées par le stockage initial, les apports, et les demandes pour le cas du barrage de Tamil Nadu, Inde. En utilisant un modèle d'optimisation par la programmation dynamique déterministe, et à partir des résultats obtenus du traitement des données d'une série de vingt ans, ils ont conclu que le traitement par un réseau de neurone artificiel est un processus d'optimisation, généralement fait par l'application du procédé de rétro-propagation de type gradient, qui détermine les valeurs des poids sur toutes les interconnexions qui expliquent mieux les relations d'entrée-sortie.

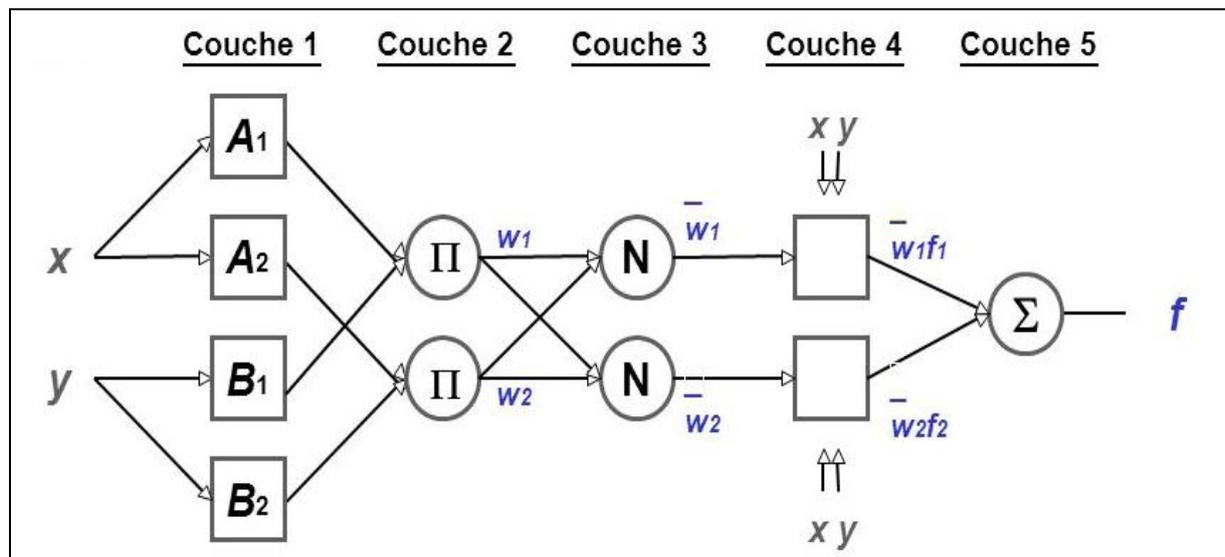
De plus les règles obtenues d'un réseau de neurone artificiel se conforment bien avec celles produites par une analyse linéaire, ainsi que les lois optimales de rétroaction obtenues à partir de l'optimisation stochastique explicite en utilisant la programmation dynamique stochastique. Par la suite, Chandramouli et Deka (2005) ont prolongé cette approche afin de déduire des règles d'exploitation optimales pour un système de réservoirs.

#### **I. 4.3.2 Technique des réseaux neuro-flous**

L'intégration des réseaux neuronaux et la logique floue ont donné naissance à la nouvelle recherche qui sont les systèmes neuro-flous. Ils ont le potentiel de capturer les avantages du réseau de neurones et de la logique floue dans un cadre simple. Les systèmes neuro-flous éliminent le problème de base dans la conception de systèmes brouillée par l'utilisation des possibilités d'apprentissage d'un réseau de neurone artificiel pour la génération automatique de la règle (IF-THEN) brouillé et l'optimisation des paramètres. Jang (1993) a pu combiner la représentation de connaissance explicite de la logique floue avec la puissance d'apprentissage des réseaux neuronaux pour obtenir les réseaux Neuro—Flous : ANFIS (*Artificial Neural Fuzzy Inference System*).

En conséquence, ces systèmes peuvent utiliser l'information linguistique de l'expert humain aussi bien que des données mesurées pendant la modélisation. Cette technique est appliquée récemment dans les domaines du traitement des signaux, le contrôle automatique, la gestion de recherche documentaire, de base de données, la vision d'ordinateur et la classification de données (Ross 1997).

Le procédé d'ANFIS comporte cinq blocs fonctionnels (Fig I.8), à savoir :



**Figure I.8** Réseau ANFIS à deux entrées et une sortie (Moody et Darken, 1988)

**Couche 1 :** Les nœuds expriment les conditions d'appartenance, ils remplissent le rôle de fuzzification. Chaque nœud est plus ou moins activé en fonction de degré d'appartenance à un sous ensemble flou donné (le nombre de nœuds associés à chaque entrée est le nombre des sous-ensembles flous qui définissent cette variable floue).

**Couche 2 :** Les nœuds expriment les règles d'inférences. Les liaisons de cette couche remplissent le rôle de la partie pré-condition des règles :

**Couche 3 :** Chaque nœud  $i$  dans cette couche correspond à une règle floue, il reçoit les sorties des neurones de fuzzification et calcule son activation en fonction de la sortie précédente  $W_i$

**Couche 4 :** Les liaisons de cette couche remplissent le rôle de la partie conséquence des règles, chaque nœud  $i$  calcule le degré de vérité normalisé d'une règle floue donnée. La valeur obtenue représente la contribution de la règle floue au résultat final.

**Couche 5 :** La sortie est obtenue en sommant l'ensemble des sorties de la couche 4

L'inconvénient principal du modèle de prévision d'ANFIS est le temps demandé dans le traitement de la structure de formation et la détermination des paramètres, qui ont pris beaucoup de temps Chang (2006).

De la littérature, plusieurs travaux ont appliqué cette technique, dans le domaine de l'hydrologie et souvent dans les études des prévisions de précipitation et des écoulements ainsi que dans l'exploitation des barrages (Vernieuwe et al (2005), Gautam et Holz (2001), Xiong et al (2001), Hasebe et Nagayama (2002), et Pinthong et al (2006)).

Hasebe et Nagayama (2002) ont employé un modèle d'optimisation par l'ANFIS pour la commande d'un barrage à usage multiples dont le bassin versant est relativement plus petit en comparant avec la capacité de barrage. Une comparaison est faite entre les exploitations du barrage en utilisant les systèmes de réseau neuro-flous et celui réels par l'exploiteur, en traitant les cas des inondations pendant les saisons d'inondation et non-inondations.

Chang (2006) a construit un modèle de neurone flous dans l'optimisation de l'exploitation du barrage de Shihmen en Taiwan, l'objectif était de construire un système de prédiction des niveaux d'eau pendant les périodes des crues, la technique d'ANFIS est appliquée en considérant les décisions prises par l'exploiteur comme des entrés.

Mehat et Jain (2009) ont utilisé la technique d'ANFIS dans afin d'améliorer la politique d'exploitation du barrage de Kalagarah en Inde d'objectifs multiples. Le but de l'étude est de minimiser les dommages dues aux inondations et sécheresses ainsi de déterminer les lâchers optimaux pour garantir les différents usagers.

Pinthong et *al* (2009) ont appliqué un algorithme neuro-flous sur base génétique (GNF) pour optimiser l'exploitation du barrage d'objectifs multiples de Pasak en Thailand. Les populations initiales sont produites dans diverses architectures neuro-flous en assignant les nombres de fonctions d'adhésion pour chaque variable. La méthode de moindre carré global est employée pour déterminer les paramètres conséquents du système neuro-flous. Chaque individuel est évalué sur la base de la fonction d'évaluation définie. L'accouplement, le croisement et la mutation sont employés pour produire la prochaine génération. Le procédé de l'algorithme génétique est arrêté quand la limite spécifique du nombre de génération ou la limite d'erreur acceptable est atteinte. Basés sur la meilleure architecture du modèle d'algorithme génétique, les paires de données d'entrée-sortie sont de nouveau employées dans le processus du traitement pour bien accorder des fonctions d'adhésion et pour produire des règles floues.

### **1.5. Influence des stratégies de la gestion des sédiments sur l'exploitation des barrages**

De nombreuses mesures de contrôle de la sédimentation des réservoirs ont été développées, dont leur faisabilité dépend de différent facteurs, tels que la disponibilité de l'excès d'eau, les objectifs de stockage, les limitations pratiques, les caractéristiques des sédiments, l'impact environnemental, le coût et les limitations réglementaires légales. La pertinence des mesures d'atténuation est spécifique au site et est généralement choisie en fonction de l'étendue du problème de sédimentation et de la quantité d'eau excédentaire disponible (Annandale et *al*, 2013). Ces derniers ont proposé une méthode pour évaluer la pertinence des mesures

d'atténuation basées sur des courbes basées sur la capacité de stockage du réservoir, l'apport moyen annuel et le rendement des sédiments dans le bassin versant.

Kantoush et Sumi (2013) ont évalué différentes techniques de gestion des sédiments pour 13 grands barrages dans le bassin du Nil (Egypte). Ils ont rapporté que la faisabilité des méthodes appropriées devrait être étudiée par une analyse coûts-bénéfices détaillée, pour quantifier et classer leurs avantages.

Petkovsek et Roca (2014) ont évalué l'impact des règles d'exploitation sur la sédimentation du barrage de Tarbela (Pakistan). En appliquant le modèle de la sédimentation du réservoir à long terme RESSASS, ils ont conclu qu'au début de la saison des crues, lorsque les niveaux sont bas et les débits d'eau élevés, les sédiments déposés au fond du réservoir peuvent déboucher les turbines et entraîner une abrasion des unités de production d'électricité. De plus la fermeture de ces turbines mène à une perte de production.

Chang et al. (2003) ont développé un modèle de soutirage des sédiments qui simule le profil de la surface du plan l'eau du barrage de Tapu (Taiwan) pendant l'opération de rabattement. A l'aide de ce modèle, la quantité de volume de sédiments évacués sera déterminée pour mettre à jour la courbe hauteur-volume du réservoir. Ils ont implanté un planning pour des opérations de vidange du fond chaque 2 ou 4 ans pendant les mois de mai et juin.

Khan et Tingsanchali (2009) ont proposé un modèle de simulation-optimisation de l'évacuation des sédiments (ROSSE) pour optimiser les courbes d'exploitation du barrage de Tarbela (Pakistan). Ils ont trouvé que la modification de la politique d'exploitation et l'augmentation des niveaux de soutirage peut augmenter la durabilité du réservoir de 28 %. A l'inverse, la diminution des volumes alloués pour l'irrigation peut arriver jusqu'à 38 %.

Shokri et al. (2013) ont appliqué la technique de la programmation dynamique stochastique (SDP) pour dériver les politiques d'exploitation optimales du barrage de Sefidroud (Iran). Ils ont conclu que l'introduction de l'incertitude du paramètre des sédiments pendant les opérations de soutirage peut augmenter la vulnérabilité et la fiabilité du système d'exploitation de 67 et 18% respectivement.

Hajiabadi et Zarghami (2014) ont appliqué un algorithme d'optimisation multi-objectif par NSGA-II pour améliorer l'exploitation du barrage de Sefidroud (Iran). Ils ont pu augmenter la quantité des sédiments évacués pendant les opérations de soutirage plus de 37 millions de tonnes, par rapport à l'exploitation actuelle, tout en garantissant les mêmes volumes des lâchers pour l'énergie hydroélectrique et l'eau domestique en aval.

Rashid et al (2015) ont développé le modèle (RESOOSE) qui est basé sur les algorithmes génétiques. Ce modèle a été appliqué pour la gestion des barrages de Tarbela, Diamer Basha

and Chashma (Pakistan) en tenant compte l'évacuation des sédiments. Ils ont trouvé que les volumes des lâchers pour l'irrigation et l'hydroélectricité peuvent être améliorés de 11 % et 13 % respectivement. Ainsi, les dommages causés par les inondations peuvent être réduits de 80 %.

## **Conclusion**

Les barrages-réservoirs sont construits durant l'histoire de l'humanité pour deux principaux objectifs, à savoir : la satisfaction des besoins en eau distribués spatialement ou temporellement et la régulation des débits des cours d'eau. La gestion de ces ouvrages est une opération complexe. Elle nécessite la considération d'un nombre important de facteurs et contraintes : techniques, économiques, sociales, environnementales et même politiques.

L'optimisation de la gestion opérationnelle des barrages et des systèmes de réservoirs est un domaine vaste et fait appel à plusieurs disciplines notamment la recherche opérationnelle.

Par le présent chapitre, nous avons abordé une revue générale de l'état d'art en matière de l'optimisation de la gestion opérationnelle des réservoirs. Dans ce contexte, les principaux objectifs de réalisation des barrages-réservoirs, les règles de gestion, les approches et les différentes techniques d'optimisation appliquées auparavant sont présentées.

Pour ce faire, nous allons structurer le présent travail de cette thèse par la présentation du cadre de l'étude et les caractéristiques des barrages réservoirs. Il est à noter que la question d'optimisation des lâchers dans notre étude est simple (c'est un seul réservoir), n'est pas de grandes dimensions et avec une seule fonction objectif à optimiser. Pour cela, la technique de la programmation dynamique déterministe hybridée avec les réseaux de neurones est maintenue pour résoudre le problème de la gestion des barrages. Cette technique est caractérisée par sa capacité de calculer les solutions optimales exactes (lâchers optimaux) permettant de déduire le modèle de gestion le plus approprié de la ressource mobilisée du barrage.

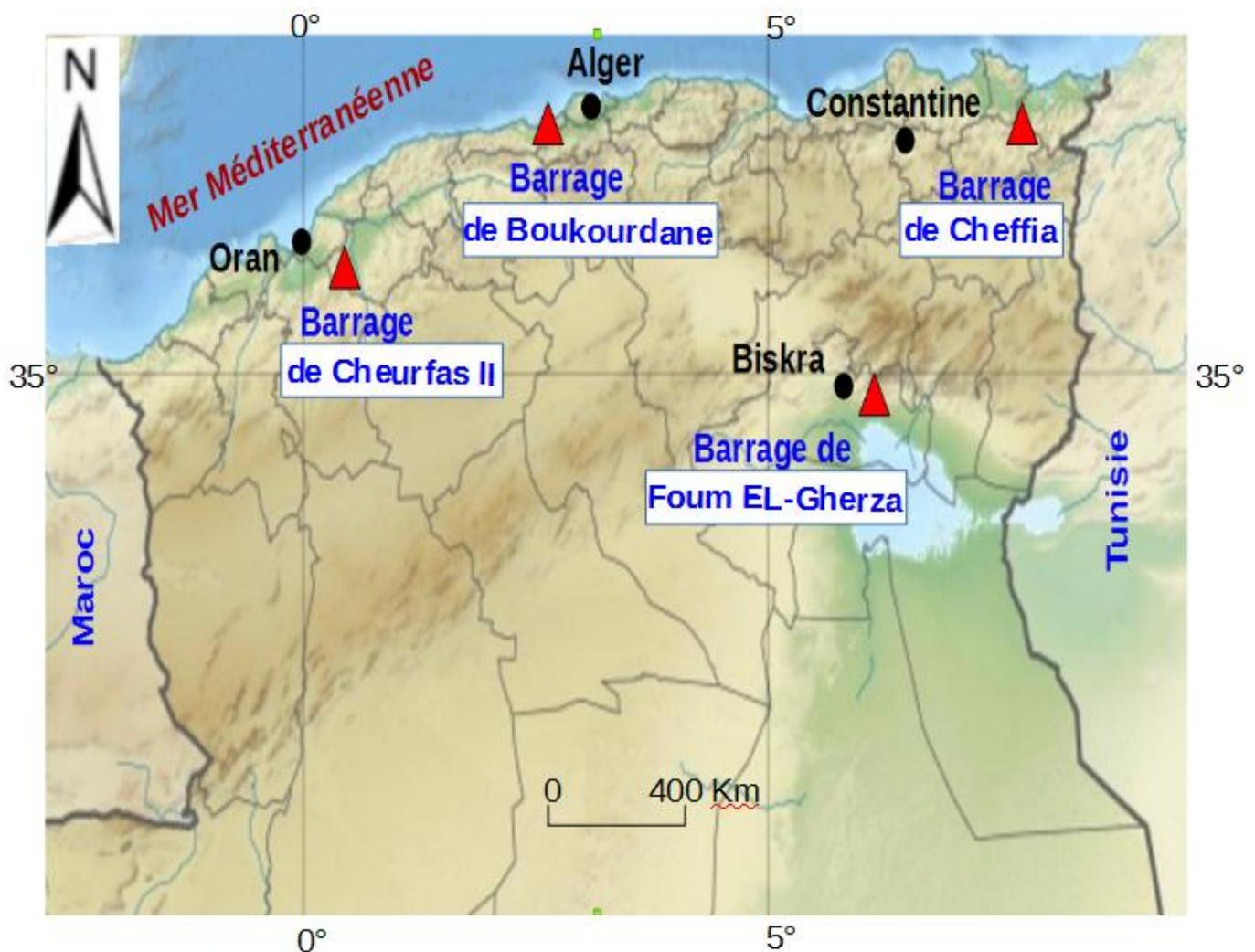
## **CHAPITRE II**

### **CADRE DE L'ETUDE**

## II. 1. PRESENTATION DES ZONES D'ETUDE

L'objectif de ce travail est d'améliorer la gestion de quatre barrages en Algérie, par l'application des techniques d'optimisation traditionnelles, ainsi que des méthodes heuristiques. Ces barrages sont choisis sous différents étages bioclimatiques. Leur implantation est donnée en figure II.1.

- Le barrage de Boukourdane (W.Tipaza) dans la zone sub-humide.
- Le barrage de Cheffia (W.Taref) dans la zone humide.
- Le barrage de Cheurfas II (W.Mascara) dans la zone semi-aride.
- Le barrage de Fom El Gherza (W.Biskra) dans la zone aride.



**Figure II.1** : Localisation des barrages d'études

## II. 1.1. Caractéristiques générales des barrages

Les caractéristiques des barrages choisis dans notre étude sont récapitulées dans le tableau II.1.

**Tableau II.1** : Caractéristiques générales des barrages choisis (ANBT, 2017)

Caractéristique	Unité	Barrage			
		Boukourdane	Cheffia	Foum El-Gherza	Cheurfas II
Côte du niveau normale de la retenue	m	119,50	165,00	198,90	225,60
Côte du niveau de plus hautes eaux	m	123,00	169,00	204,25	228,00
Hauteur du barrage	m	74,00	51,00	73,00	82,40
Longueur du barrage	m	610,00	650,00	60,00	286,00
Epaisseur du barrage (au sommet)	m	3,25	10,00	6,25	5,00
Epaisseur du barrage (à la base)	m	7,50	214,00	9,50	8,00
Capacité totale de la retenue	Mm <sup>3</sup>	105,00	171,00	47,00	75,00
Surface du bassin versant	Km <sup>2</sup>	156,00	2600,00	1300,00	476,00

## II. 1.2 Caractéristiques climatologiques et hydrométriques des barrages

### II. 1.2.1 Précipitations

Les précipitations moyennes mensuelles sur les sites des barrages, sont récapitulées dans le tableau II.2

**Tableau II.2 :** Précipitations moyennes mensuelles (en mm)

Mois	Barrage			
	Boukourdane (de 1969 à 2016)	Cheffia (de 1971 à 2016)	Foum El-Gherza (de 1961 à 2016)	Cheurfas II (de 1976 à 2016)
Septembre	75,88	44,03	12,04	11,2
Octobre	72,73	68,32	9,33	21,3
Novembre	69,66	98,6	16,51	35,15
Décembre	53,23	114,15	8,04	35,08
Janvier	37,68	119,96	16,26	32
Février	7,78	103,77	9,24	32,1
Mars	2,27	89,46	14,95	31,8
Avril	4,88	88,69	11,83	25,2
Mai	27,45	51,35	8,35	19,3
Juin	54,87	18,38	5,83	3,7
Juillet	81,1	3,44	0,52	1,3
Août	84,47	9,93	3,93	2,2
Total annuel	572	810	117	250

(ANRH, 2017)

### II. 1.2. 2 Apports liquides

Les apports mensuels aux barrages choisis sont reconstitués à partir de l'équation du bilan hydrique. Ils sont récapitulés dans le tableau II.3.

**Tableau II. 3** : Apports moyens mensuels (en Hm<sup>3</sup>), (ANBT, 2017)

Mois	Barrage			
	Boukourdane (de 1996 à 2016)	Cheffia (de 1996 à 2016)	Foum El-Gherza (de 1996 à 2016)	Cheurfas II (de 1999 à 2016)
Septembre	0,22	1	2,72	2,05
Octobre	0,34	1	6,68	4,5
Novembre	1,53	9	1,37	4,66
Décembre	2,38	21	1,32	2,81
Janvier	2,57	34	1,69	3,22
Février	4,34	39	1,04	2,64
Mars	5,36	26	3,37	2,3
Avril	2,33	19	5,02	2,64
Mai	1,93	5	5,85	1,68
Juin	0,49	1	1,27	0,73
Juillet	0,17	0,12	0,61	0,44
Août	0,12	0,21	1,13	0,39
<b>Total annuel</b>	<b>21,78</b>	<b>156,33</b>	<b>32,07</b>	<b>28,06</b>

### II. 1.2.3 Evaporation

L'évaporation est mesurée au niveau des stations météorologiques situées sur le site des différents barrages. Le tableau II.4 décrit les volumes moyens mensuels évaporés pour chaque barrage.

Tableau II.4: Volumes évaporés moyens mensuels (en Hm<sup>3</sup>), (ANBT, 2017)

Mois	Barrage			
	Boukourdane (de 1995 à 2016)	Cheffia (de 1997 à 2016)	Foum El-Gherza (de 1997 à 2016)	Cheurfas II (de 1999 à 2016)
Septembre	0,38	0,66	0,39	0,43
Octobre	0,27	0,43	0,31	0,31
Novembre	0,14	0,26	0,19	0,21
Décembre	0,11	0,2	0,11	0,15
Janvier	0,11	0,18	0,13	0,13
Février	0,14	0,21	0,17	0,16
Mars	0,25	0,33	0,29	0,23
Avril	0,31	0,44	0,38	0,28
Mai	0,42	0,6	0,52	0,38
Juin	0,57	0,84	0,6	0,49
Juillet	0,62	1,03	0,67	0,63
Août	0,56	0,93	0,55	0,63

Le détail des caractéristiques des quatre barrages choisis dans notre étude est présenté dans l'annexe B.

## II. 2. GESTION ACTUELLE DES BARRAGES

### II. 2.1. Barrage de Boukourdane

Le barrage de Boukourdane est destiné à l'alimentation en eau des deux secteurs :

- 1- L'Alimentation en Eau Potable de la ville de Tipaza et ces environs (Cherchell, Sidi Ghiles, Sidi Moussa, Sidi Amar et Nador).
- 2- L'irrigation de la vallée de l'oued EL Hachem avec une superficie irrigable de 191,50 Ha et une partie de l'ouest de la Mitidja avec une superficie irrigable de 3512,00 Ha

Les demandes mensuelles (en hm<sup>3</sup>) pour l'AEP ainsi que les besoins en eau pour l'irrigation du futur périmètre du sahel Algérois ouest sont récapitulés dans le tableau II.5.

Tableau II.5: Besoins mensuels en eau (ANBT, 2017)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total Annuel
AEP (Hm <sup>3</sup> )	0,74	0,77	0,74	0,77	0,77	0,74	0,77	0,74	0,77	0,74	0,77	0,77	9,00
Irrigation (Hm <sup>3</sup> )	1,70	0,30	0,07	0,02	0,04	0,12	0,77	1,70	1,70	2,97	4,53	4,12	18,00
Total Mensuel (Hm <sup>3</sup> )	2,44	1,07	0,81	0,79	0,81	0,86	1,54	2,44	2,47	3,71	5,30	4,89	27,00

Le tableau II.6 mentionne les lâchers annuels réalisés pour l'AEP et l'irrigation à partir du barrage de Boukourdane.

**Tableau II.6 :** Volumes annuels des lâchers destinés pour l'AEP et l'irrigation à partir du barrage de Boukourdane

Années	Lâchers pour AEP (Hm <sup>3</sup> )	Lâchers pour Irrigation (Hm <sup>3</sup> )	Volume demandée (Hm <sup>3</sup> )	Taux de satisfaction (%)
2005	8,46	2,82	5,00	16,0
2006	7,89	5,43	7,15	30,0
2007	9,68	6,72	6,50	37,0
2008	9,70	5,48	4,00	30,0
2009	11,23	1,50	5,00	8,0
2010	12,26	2,07	3,00	11,5
2011	13,04	4,33	7,00	24,0
2012	12,91	8,09	7,50	45,0
2013	12,79	2,95	8,00	16,0
2014	12,98	3,90	8,00	22,0
2015	12,80	3,87	5,50	21,5
2016	13,24	5,08	9,50	28,0

(ONID, 2017)

D'après le tableau II.28, on peut remarquer une nette augmentation des lâchers pour l'AEP pour cause de l'accroissement de la population. Ainsi une variation des lâchers pour l'irrigation, qui sont directement liés aux volumes des apports annuels au barrage. Le taux de satisfaction moyen pour l'irrigation est de 24%.

On peut même remarquer que la satisfaction de la demande n'a jamais atteint la moitié. Les lâchers maximaux pour l'irrigation (8,09 Mm<sup>3</sup>) ont été enregistrés durant l'année 2012, avec un apport de 45Mm<sup>3</sup>.

## II. 2.2- Barrage de Cheffia

Le barrage de Cheffia est destiné à l'alimentation en eau de trois secteurs :

- 1- L'Alimentation en Eau Potable de la ville d'Annaba, qui détient 39,21% de la dotation totale
- 2- L'irrigation du périmètre de Bounamoussa qui couvre une superficie nette irrigable de 15000 ha, avec un pourcentage de 49%
- 3- L'industrie, dont le complexe d'El-Hadjar est alimenté gravitairement par le barrage de Cheffia, avec un pourcentage égal à 11,76.

Les demandes mensuelles (en hm<sup>3</sup>) pour les trois secteurs sont récapitulées dans le tableau II.7.

Tableau II.7 : Besoins mensuels en eau

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total annuel
AEP (Hm <sup>3</sup> )	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	40,00
Irrigation (Hm <sup>3</sup> )	6,00	3,50	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	5,00	8,00	15,00	9,50	50,0
AEI (Hm <sup>3</sup> )	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,00
Total mensuel (Hm <sup>3</sup> )	10,33	7,83	5,83	4,33	4,33	4,33	4,33	5,83	9,33	12,33	19,33	13,33	102,00

(ANBT, 2017)

L'historique de l'exploitation du barrage de Cheffia depuis 2003 à 2016 est récapitulé dans le tableau II.8.

**Tableau II.8** : Lâchers annuels à partir du barrage de Cheffia

année	Apport (Mm <sup>3</sup> )	Lâcher domestique et industrielle (Mm <sup>3</sup> )	Lâcher irrigation (Mm <sup>3</sup> )	Taux de satisfaction (%)
2003	288,40	45,98	33,71	67,42
2004	338,00	47,25	25,43	50,86
2005	355,27	55,82	29,63	59,26
2006	187,13	46,46	35,00	70,00
2007	80,85	47,73	26,38	52,76
2008	34,36	50,68	21,75	43,50
2009	114,84	48,75	12,34	24,68
2010	175,79	49,73	22,37	44,74
2011	118,35	53,80	19,50	39,00
2012	268,82	56,06	18,10	36,20
2013	66,14	53,52	22,27	44,54
2014	114,05	50,79	23,00	46,00
2015	279,77	51,48	27,54	55,08
2016	38,05	51,00	29,26	58,52

(ONID, 2017)

D'après le tableau II. 8, on peut constater que :

- La satisfaction de la demande pour l'AEP et l'AEI est assurée de 97%,
- Le volume fourni pour l'irrigation représente 14,13% des apports au barrage
- Le volume maximal des lâchers pour l'irrigation correspond à 35 Mm<sup>3</sup>. Il a été fourni pendant l'année 2006 où les apports étaient de 187 Mm<sup>3</sup>
- Le volume minimal correspond à 12,34 Mm<sup>3</sup>. Il a été fourni pendant l'année 2009 où les apports étaient de 115 Mm<sup>3</sup>
- Le taux de satisfaction pour l'irrigation est estimé à 49,47%, ce qui signifie que le barrage n'a pas été exploité efficacement, vu le volume considérable des apports.

### II. 2.3. Barrage de Foug El-Gherza

Le barrage de Foug El-Gherza est destiné pour l'irrigation des palmeraies, dont les besoins en eau sont estimés par Merabet et Souissi (2008) dans le tableau II.9.

**Tableau II.9** : Besoin mensuels pour l'irrigation à partir du barrage de Foug El-Gherza

Mois	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total annuel
Besoin en eau (Hm <sup>3</sup> )	1,86	2,46	3,60	4,77	6,51	8,19	9,30	8,90	6,12	4,28	2,52	1,77	48

Le tableau II.10 mentionne les lâchers annuels réalisés pour l'irrigation à partir du barrage de Foug El-Gherza.

**Tableau II.10** : Lâchers annuels à partir du barrage de Foug El-Gherza

Année	Apport (Mm <sup>3</sup> )	Lâcher irrigation (Mm <sup>3</sup> )	Taux de satisfaction (%)
2000	21,71	10,77	22,45
2001	22,66	6,09	12,69
2	14,98	6,93	14,44
3	28,67	5,40	11,25
4	21,91	6,55	13,55
5	12,52	3,24	6,75
6	45,26	5,74	11,97
7	7,40	7,68	16,04
8	17,63	2,70	5,62
9	99,64	17,95	37,48
10	14,91	13,54	28,21
11	109,40	15,94	33,21
12	8,36	8,16	16,88
13	16,09	3,64	7,59
14	1,29	0,00	0,00
15	43,32	2,59	5,40
16	8,29	1,76	3,68

(ONID, 2017)

A partir du tableau II. 10, on a pu tirer les remarques suivantes :

- Le volume fourni pour l'irrigation à partir du barrage de Foum El-Gherza représente 20% des apports au barrage
- Les demandes en eau pour l'irrigation n'ont jamais été satisfaites. Le taux de satisfaction moyen est estimé à 14,54%, ce qui signifie que le barrage n'a pas été exploité efficacement.
- Le volume maximal des lâchers correspond à 17,95 Mm<sup>3</sup> a été fourni pendant l'année 2009 où les apports étaient de 99,63 Mm<sup>3</sup>
- Le barrage n'a pas été en service durant l'année 2014 où les apports étaient de 1,29 Mm<sup>3</sup>

## II. 2.4. Barrage de Cheurfas II

Le barrage de Cheurfas II a été destiné au premier lieu à l'irrigation des périmètres agricoles de la plaine de Sig (W.Mascara). Avec la croissance de la demande en eau, il a été décidé en 2008 d'alimenter en eau la partie Ouest de la wilaya de Mascara et une partie de l'est de la wilaya de sidi Bel-Abbas)

Les demandes mensuelles (en hm<sup>3</sup>) pour les trois secteurs sont récapitulées dans le tableau II. 11.

Tableau II. 11 : Besoins mensuels en eau pour le barrage de Cheurfas II

Mois	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total annuel
AEP (Hm <sup>3</sup> )	0,14	0,23	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34	0,32	0,29	0,22	0,17	3,31
Irrigation (Hm <sup>3</sup> )	1,00	1,00	2,00	2,00	2,50	4,00	6,00	6,00	4,00	2,50	1,00	1,00	33,00
Total mensuel (Hm <sup>3</sup> )	1,14	1,23	2,3	2,31	2,82	4,33	6,34	6,34	4,32	2,79	1,22	1,17	36,31

(ANBT, 2017)

L'historique de l'exploitation du barrage de Cheurfas II depuis 2000 à 2016 est récapitulé dans le tableau II.12.

**Tableau II.12** : Lâchers annuels pour l'irrigation à partir du barrage de Cheurfas II

Années	Apport (Mm <sup>3</sup> )	Stock (Mm <sup>3</sup> )	Lâchers pour Irrigation (Mm <sup>3</sup> )	Volume demandée (Mm <sup>3</sup> )	Taux de satisfaction (%)
2000	19,50	9,21	6,20	6,40	24,61
2001	19,00	16,12	10,00	13,00	50,00
2002	15,00	17,90	8,20	9,00	34,61
2003	11,00	18,27	7,00	11,00	42,37
2004	15,00	13,64	6,00	9,00	34,61
2005	11,00	15,78	3,60	3,60	13,84
2006	8,00	17,97	9,00	7,85	30,19
2007	20,00	13,12	7,00	6,80	26,15
2008	45,00	18,76	7,50	7,50	28,84
2009	21,00	49,13	20,00	20,00	76,92
2010	21,00	31,96	20,00	15,80	60,76
2011	25,00	27,79	20,00	13,00	50,00
2012	56,00	29,98	20,00	13,40	51,53
2013	52,00	51,21	23,00	21,50	82,69
2014	60,00	53,08	23,00	20,75	79,82
2015	3,00	66,40	26,00	26,00	100,00

(ONID, 2017)

D'après le tableau II.12, on peut remarquer que les demandes des agriculteurs sont accordées suivant : les apports au barrage, le stock et le volume demandé.

Deux périodes différentes ont été enregistrées suivant le taux de satisfaction. La première qui s'étale de l'année 2000 à 2008, où la satisfaction de la demande était au-dessous de la moyenne. Alors que dans deuxième, de l'année 2009 à 2015, la satisfaction de la demande était au-dessus de la moyenne.

Ainsi, on peut constater une nette augmentation des lâchers pour l'irrigation, qui s'est multiplié à deux reprises. La première de l'année 2006 à 2010 où la consommation est augmentée de 7,85Mm<sup>3</sup> jusqu'à 15,8Mm<sup>3</sup>. Alors que deuxième augmentation a été

enregistrée de l'année 2011 à 2015 où la consommation est multipliée de  $13\text{Mm}^3$  jusqu'à  $26\text{Mm}^3$ .

Le taux de satisfaction moyen est estimé à 49,18%,

## Conclusion

L'opération de la gestion d'un barrage consiste à définir une série de décisions de lâchers qui maximisent les critères de satisfaction sur l'ensemble de la période de gestion.

Le choix des barrages dans cette étude est fondé sous différents étages bioclimatiques. A savoir : le barrage de Boukerdane (W.Tipaza) dans la zone sub-humide, le barrage de Cheffia (W.Taref) dans la zone humide, le barrage de Cheurfas II (W.Mascara) dans la zone semi-aride et le barrage de Foug El Ghorza (W.Biskra) dans la zone aride.

L'analyse de la gestion actuelle du barrage de Boukerdane a montré que la satisfaction de la demande en eau pour l'irrigation n'a jamais atteint la moitié. Le taux global de satisfaction pour l'irrigation est de 24%. Les lâchers maximaux pour l'irrigation ( $36,87\text{ Mm}^3$ ) ont été enregistrés durant l'année 2011/2012, avec un apport de  $43\text{Mm}^3$ .

Quant au barrage de Cheffia, le taux de satisfaction pour l'irrigation est estimé à 49,47%. Le volume maximal des lâchers pour l'irrigation correspond à  $35\text{ Mm}^3$ . Il a été fourni pendant l'année 2006.

Pour le barrage de Foug El-Ghorza, le taux de satisfaction moyen est estimé à 14,54%, ce qui signifie que le barrage n'a pas été exploité efficacement. Le volume maximal des lâchers correspond à  $17,95\text{ Mm}^3$  a été fourni pendant l'année 2009 où les apports étaient de  $99,63\text{ Mm}^3$ . On a même enregistré que le barrage n'a pas été en service durant l'année 2014 où les apports étaient de  $1,29\text{ Mm}^3$

En fin, l'analyse de la gestion actuelle du barrage de Cheurfas II, a permis de distinguer deux périodes différentes.

La première qui s'étale de l'année 2000 à 2008, où la satisfaction de la demande était au-dessous de la moyenne. Alors que dans deuxième, de l'année 2009 à 2015, la satisfaction de la demande était au-dessus de la moyenne. Le taux de satisfaction moyen est estimé à 49,18%,

## **CHAPITRE III**

# **OPTIMISATION DE LA GESTION DES BARRAGES- RESRVOIRS**

## Introduction

Ce chapitre explore la possibilité de dériver les courbes optimales des lâchers pour l'irrigation des quatre barrages, en garantissant les demandes pour l'AEP et l'AEI qui sont en première priori, selon l'article N°12 de la loi relative de l'eau de l'année 2005.

La technique de la programmation dynamique déterministe est appliquée pour résoudre le problème d'optimisation de la gestion des réservoirs. Ainsi, les réseaux de neurones sont utilisés afin de d'améliorer les résultats de l'optimisation.

### III. 1. FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME D'OPTIMISATION

La résolution du problème d'optimisation de la gestion des barrages consiste à utiliser la Programmation Dynamique Déterministe (PDD) pour déterminer les valeurs des lâchers pour l'irrigation ( $R_t$ ). Cette méthode repose sur le principe d'optimalité dit de Bellman.

*"Une politique optimale a la propriété que quel que soit l'état initial et les décisions initiales, les décisions restantes doivent constituer une politique optimale pour l'état résultant des premières décisions". ((Bellman-1957) in (Parent 1991)).*

Le calcul des valeurs de la fonction objectif  $F$  est réalisé par la résolution descendante (*Backward*), c.-à-d à partir d'un état final  $t_f$ , jusqu'à l'instant initial  $t_0$  via une relation de récurrence inverse. Le terme "inverse" signifie que le temps est compté à rebours lors des itérations successives du calcul.

Cette équation de récurrence est appelée équation de Bellman (équation III.1).

$$F_t(S_t) = \min_{R_t} \{ f(S_t, A_t) + F_{t+1}(S_{t+1}) \} \quad (\text{III.1})$$

A une période  $t$ , la décision optimale est celle qui minimise la somme de la valeur de la fonction objectif à cette date  $f(S_t, A_t)$  et l'intégrale des valeurs de la fonction objectif à partir de  $t+1$  jusqu'à l'horizon de gestion  $t_f$ .

### III. 2. CHOIX DE LA FONCTION OBJECTIF

La fonction objectif doit représenter de manière mathématique les attentes du barragiste et exprimant les objectifs souhaitées. Le choix de cette fonction est délicat puisqu'elle est le centre de la gestion et exclut tous autres caractères qu'elle n'explique pas.

Pour notre étude, la fonction ‘‘objectif’’ serait la minimisation de la somme des carrés de l’écart demande-lâcher et du déficit de stock (expression III.2)

$$F = \min \left\{ \sum_t^{12} \left[ (R_t - R_{obj}) / R_{\max} \right]^2 + \sum_t^{12} \left[ (S_t - S_{obj}) / S_{\max} \right]^2 \right\} \quad (\text{III.2})$$

Avec,

$R_t$  : Lâcher à optimiser entre t et t+1 ( $\text{Mm}^3$ )

$R_{obj}$  : Lâcher objectif pour le mois t ( $\text{Mm}^3$ )

$R_{\max}$  : Lâcher maximal, qui correspond au mois du pointe ( $\text{Mm}^3$ )

$S_t$  : Stock au niveau du barrage au mois t ( $\text{Mm}^3$ )

$S_{t+1}$  : Stock au niveau du barrage au mois t+1 ( $\text{Mm}^3$ )

$S_{obj}$  : Stock objectif au mois t ( $\text{Mm}^3$ )

$S_{\max}$  : Stock maximal du réservoir ( $\text{Mm}^3$ )

Les contraintes appliquées à la gestion d'une réserve hydraulique s'expriment par l'équation de conservation des volumes ou équation de continuité, donnée par les expressions : III.3, III.4 et III.5.

$$S_{t+1} = S_t + A_t - R_t - P_t \quad (\text{III.3})$$

Avec,

$$S_{\min} < S_{t+1} < S_{\max} \quad (\text{III.4})$$

Et

$$R_{\min} < R_t < R_{\max} \quad (\text{III.5})$$

Où :

$A_t$  : Apport au barrage pendant le mois t ( $\text{Mm}^3$ )

$P_t$  : Pertes au niveau du barrage au mois t ( $\text{Mm}^3$ )

$S_{\min}$  : Stock minimal au niveau du barrage ( $\text{Mm}^3$ )

$S_{\max}$  : Stock maximal au niveau du barrage ( $\text{Mm}^3$ )

$R_{\min}$  : Lâcher minimal pour le mois t ( $\text{Mm}^3$ )

$R_{\max}$  : Lâcher maximal pour le mois t ( $\text{Mm}^3$ )

Pour chaque période t (mois), les variables d'état ( $S_t$ ) et les variables de décision ( $R_t$ ) sont discrétisées en N classes suivant la capacité de chaque barrage. On choisit d'adopter comme stock objectif de chaque mois la moyenne des stockages mensuels historiques. Les lâchers objectifs sont choisis selon les demandes historiques pour chaque barrage.

L'annexe C présente un exemple explicatif du calcul des lâchers optimaux par la technique de la PDD.

**III. 3. EVALUATION DES LACHERS ET STOCKS OBJECTIFS**

Les lâchers et stocks objectifs (en Mm<sup>3</sup>) pour chaque barrage sont récapitulés dans les tableaux III.1, III.2, III.3 et III.4.

Tableau III.1: Lâchers et stock objectif du barrage de Boukourdane

Mois	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Lâchers Objectif	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,0	1,6	1,8	1,6	1,0	0,4	0,0
Stock Objectif	32,5	34,0	38,0	43,0	44,3	45,0	43,2	40,0	36,7	34,0	31,5	31,0

Avec,  $S_{min} = 10Mm^3$ ,  $S_{max} = 60Mm^3$ ,  $R_{min} = 0Mm^3$  et  $R_{max} = 2Mm^3$

Le réservoir du barrage de Boukourdane est divisé en 246 classes de 0,2 Mm<sup>3</sup>

Les lâchers possibles pour l'irrigation sont divisés en classes de 0,2 Mm<sup>3</sup>

Tableau III.2: Lâchers et stock objectif (en Mm<sup>3</sup>) du barrage de Cheffia

Mois	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Lâchers Objectif	0,0	0,0	0,0	0,5	1,5	4,0	7,5	5,0	3,0	1,5	0,5	0,0
Stock Objectif	105	120	130	135	130	120	135	100	90	85	85	90

Avec,  $S_{min} = 30 Mm^3$ ,  $S_{max} = 170 Mm^3$ ,  $R_{min} = 0Mm^3$  et  $R_{max} = 8 Mm^3$

Le réservoir du barrage de Cheffia est divisé en 280 classes de 0,5 Mm<sup>3</sup>

Les lâchers possibles pour l'irrigation sont divisés en classes de 0,5 Mm<sup>3</sup>

Tableau III.3: Lâchers et stock objectif du barrage de Foug El Gherza

Mois	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Lâchers Objectif	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	4,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,5
Stock Objectif	7	8	9	10	10	9	7	6	7	9	8	8

Avec,  $S_{\min} = 3\text{Mm}^3$ ,  $S_{\max} = 16\text{Mm}^3$ ,  $R_{\min} = 0\text{Mm}^3$  et  $R_{\max} = 4\text{Mm}^3$

Le réservoir du barrage de Foug El-Gherza est divisé en 54 classes de  $0,25\text{Mm}^3$

Les lâchers possibles pour l'irrigation sont divisés en classes de  $0,25\text{Mm}^3$

Tableau III.4: Lâchers et stock objectif du barrage de Cheurfas II

Mois	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Lâchers Objectif	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	3,0	5,0	5,0	3,0	1,0	0,5	0,5
Stock Objectif	36,0	37,0	36,0	36,5	37,0	35,0	30,0	27,0	23,5	26,5	32,0	35,5

Avec,  $S_{\min} = 4\text{Mm}^3$ ,  $S_{\max} = 58\text{Mm}^3$ ,  $R_{\min} = 0\text{Mm}^3$  et  $R_{\max} = 5\text{Mm}^3$

Le réservoir du barrage de Cheurfas II est divisé en 212 classes de  $0,25\text{Mm}^3$ .

Les lâchers possibles pour l'irrigation sont divisés en classes de  $0,25\text{Mm}^3$

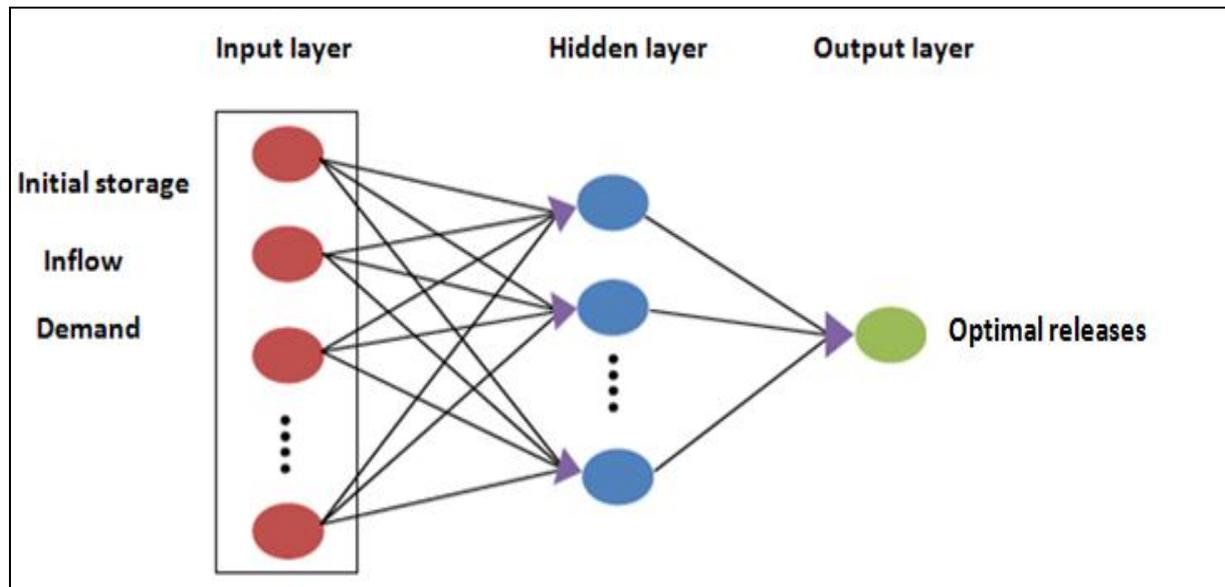
### III. 4. SIMULATION DE L'EXPLOITATION DES BARRAGES PAR LES RESEAUX DE NEURONES

Dans l'optimisation nous spécifions le résultat que nous voulons obtenir (l'objectif), à partir d'une certaine quantité d'entrée, d'où on peut établir les lâchers les moins pénalisants par rapport à un critère choisi. Tandis que dans la simulation nous spécifions l'entrée et voyons juste quel résultat obtenir. La procédure de la simulation est basée sur la question : *What-if*.

Elle est considérée comme moyen rapide en évaluant d'avance la performance du système.

La simulation de l'exploitation des barrages par les réseaux de neurones est appliquée en considérant un modèle du type *Multilayer Perceptron* MLP, dont les vecteurs d'entrées sont : Stocks, Apports et Demandes. Les lâchers optimaux obtenus à partir de la PDD sont considérés comme des sorties (figure III.1).

L'apprentissage se fait par l'algorithme de *Levenberg-Marquard*. Pour la fonction d'activation entre les couches cachées, elle est de type sigmoïde (tansig) et pour la couche des sorties elle est linéaire de type pure-line. Dans l'étape de l'apprentissage, 75% des données sont employées et les reste seront utilisés pour l'étape de validation. Le nombre d'épochs (itérations) est pris : 2000



**Figure III.1:** Architecture du réseau de neurone MLP

Pour obtenir le meilleur réseau, qui correspond à un nombre optimal de neurone à retenir dans les couches, des indicateurs de performance sont calculés, tel que :

Le coefficient de Nash–Sutcliffe (Nash) est donné par l'expression III. 6

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{ti} - \bar{R}_{ti})^2}{\sum_{i=1}^N (R_{ti} - \bar{R}_{ti})^2} \quad (\text{III. 6})$$

La racine de l'erreur moyenne des carrés (*Root Mean Squared Error*) RMSE est donnée par l'expression III. 7

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R_{ti} - \bar{R}_{ti})^2}{N}} \quad (\text{III. 7})$$

Le coefficient de détermination  $R^2$  est donné par l'expression III. 8

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{R}_{ti} - \bar{\hat{R}}_{ti})(R_{ti} - \bar{R}_{ti})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (\hat{R}_{ti} - \bar{\hat{R}}_{ti})^2\right) \left(\sum_{i=1}^N (R_{ti} - \bar{R}_{ti})^2\right)}} \right] \quad (\text{III. 8})$$

Le programme de simulation de la gestion d'un barrage par les réseaux de neurones est présenté dans l'annexe D.

### III. 5. DISCUSSION DES RESULTATS

#### III. 5.1 Résultats de l'optimisation

Les périodes considérées dans la procédure de l'optimisation pour les barrages retenus sont récapitulées dans le tableau III.5.

**Tableau III.5** : Les différentes périodes de l'optimisation

Barrage	Période de l'optimisation	
	Début de la période	Fin de la période
Boukourdane	Janvier 2005	Décembre 2016
Cheffia	Janvier 2003	Décembre 2016
Foum El-Gherza	Janvier 2007	Décembre 2016
Cheurfas II	Janvier 2008	Décembre 2016

Le calcul des lâchers optimaux a été procédé en suivant l'organigramme du programme d'optimisation de la gestion des barrages par la PDD, présenté dans la figure III.2.

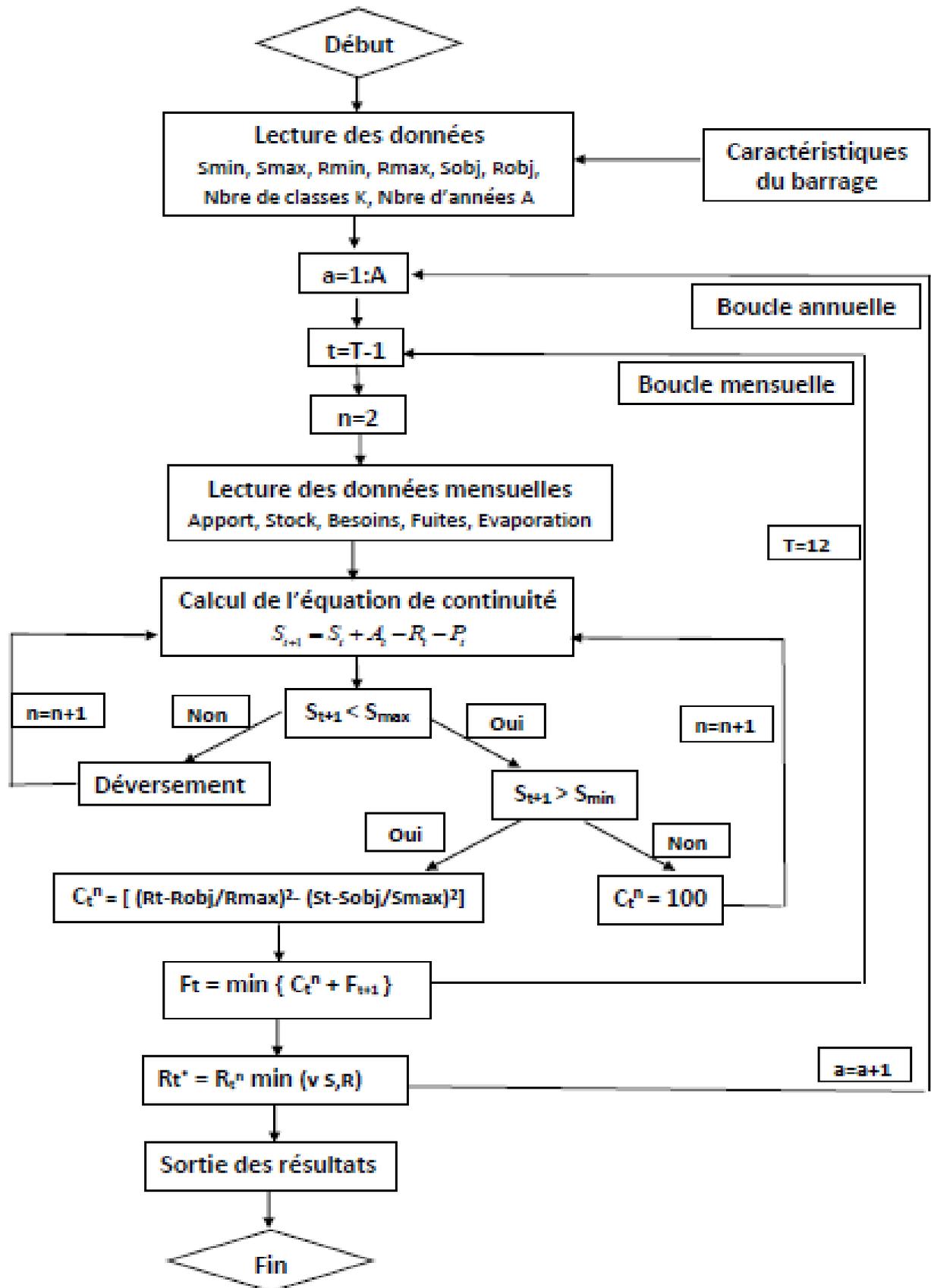
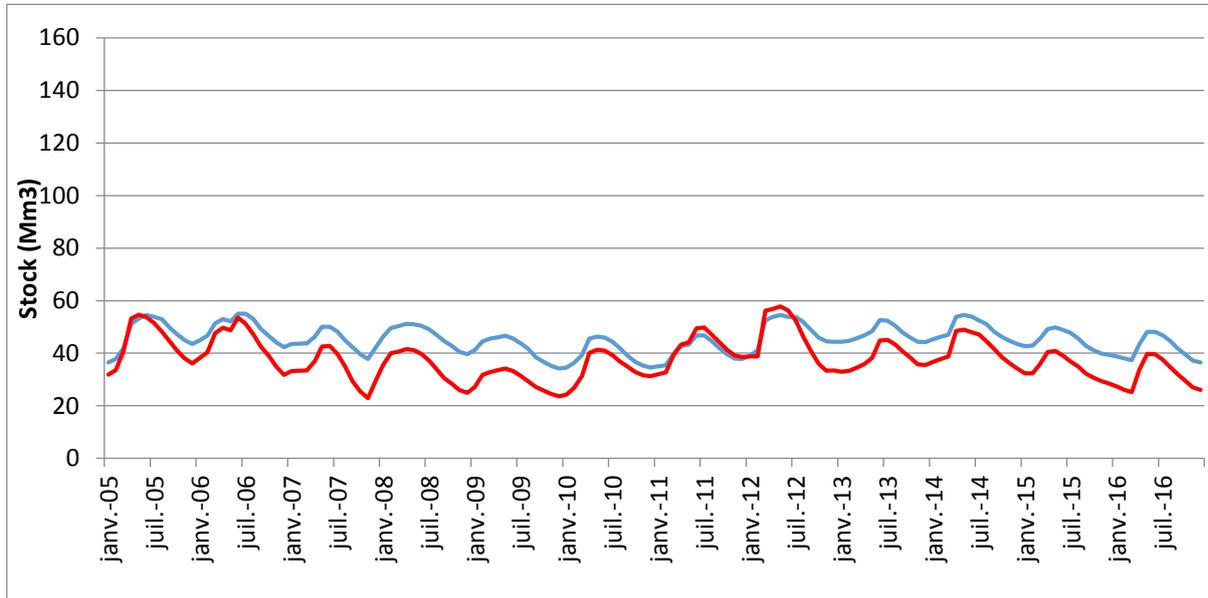
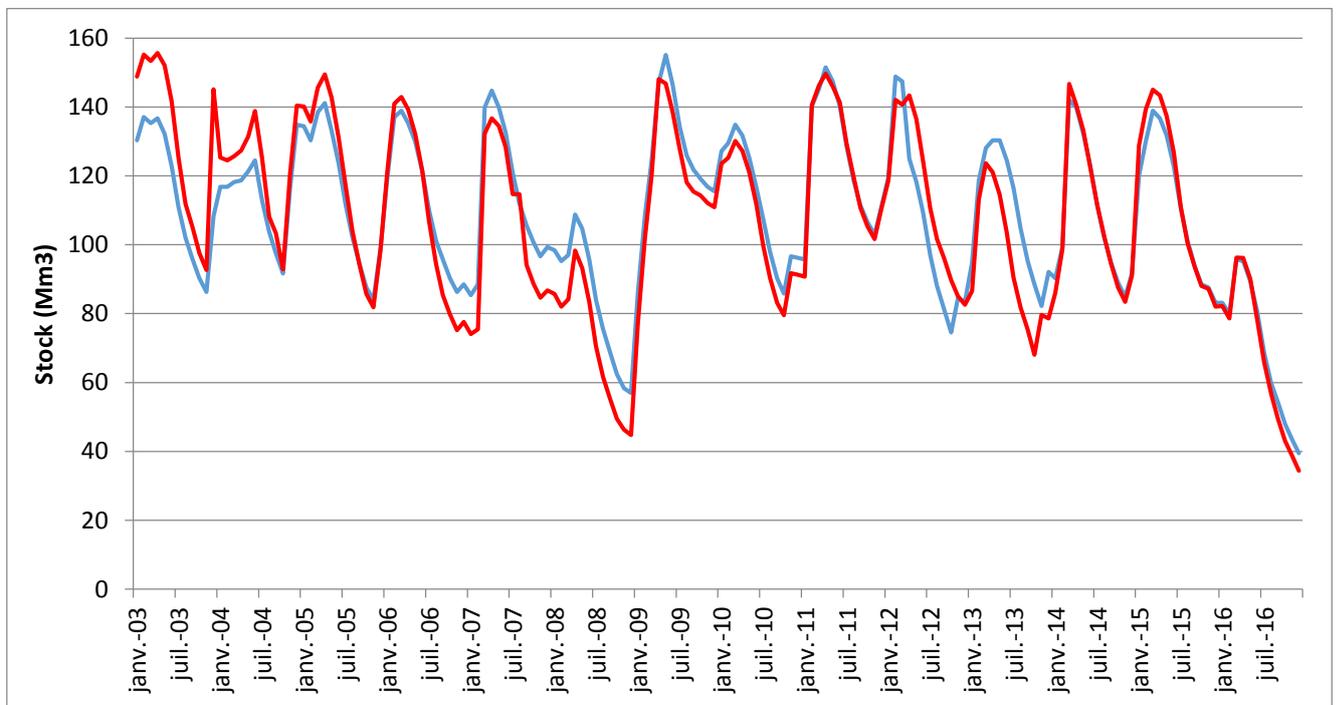


Figure III.2 Organigramme du programme d'optimisation de la gestion des barrages par la PDD

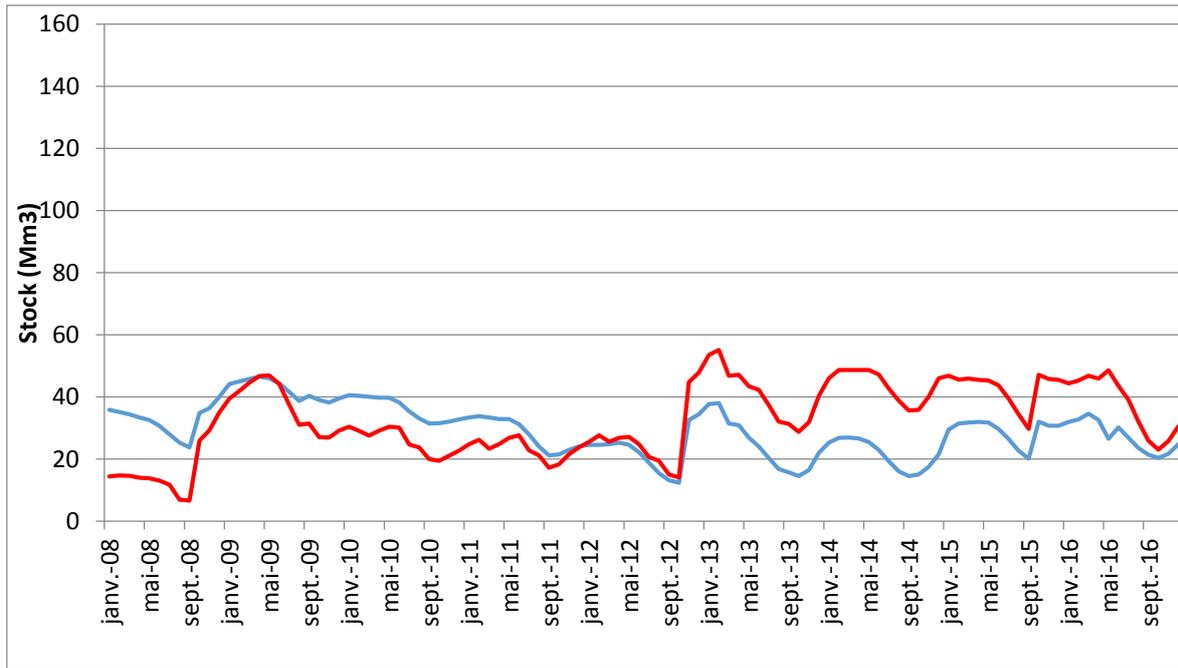
Les résultats de l'optimisation ont montré que les demandes objectives ont été satisfaites pour les trois premiers barrages. Les stocks optimaux correspondant sont représentés dans la figure III. 3.



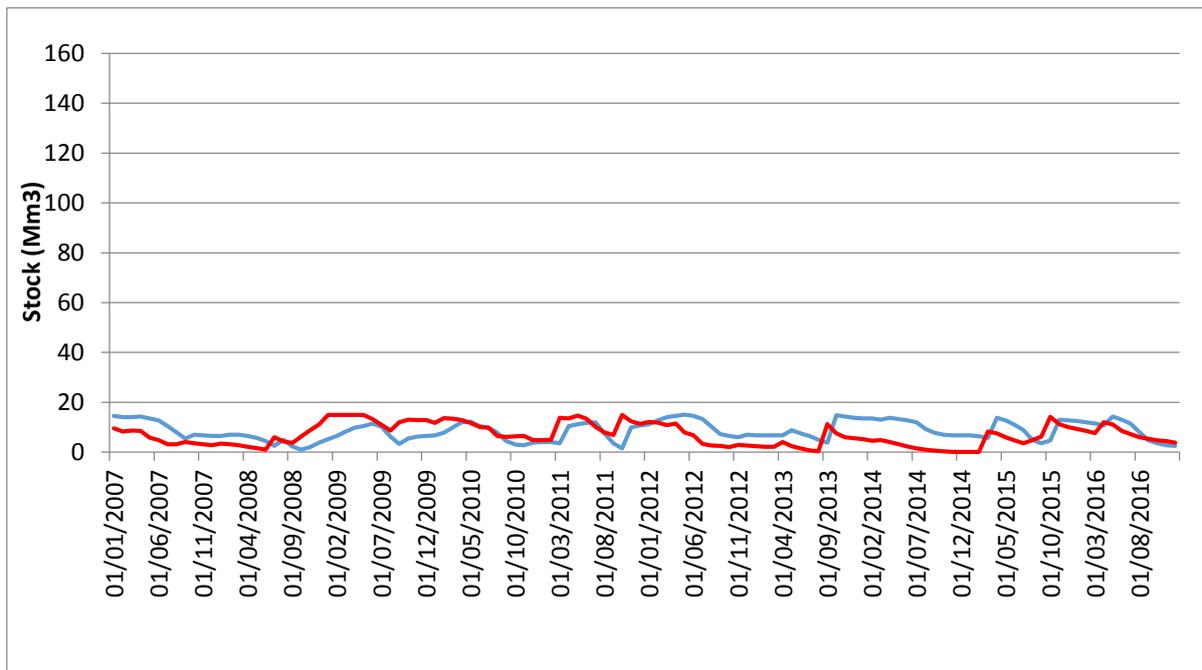
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 3 : Stocks optimaux dérivés par la PDDNN. (a) Boukourdane, (b) Cheffia,

(c) Cheurfa II et (d) Foum el-Gherza

Optimal — Actuel

Pour le barrage de Boukourdane (figure III.3.a), il apparaît que les stocks optimaux sont supérieurs aux stocks objectifs (moyens) à part l'année 2011–2012 où les apports étaient de 43Mm<sup>3</sup>. Dans cette situation, les gestionnaires du barrage étaient obligés de soutirer 11Mm<sup>3</sup> par la vidange de fond.

Pour le barrage de Cheffia (figure III.3.b), les stocks optimaux sont très proches des stocks objectifs, ce qui juge que nos résultats se situent dans le domaine optimal.

Pour le barrage de Cheurffa II (figure III.3.c), on remarque qu'il y a deux périodes. Dans la première de 2008 à 2011, les stocks optimaux sont supérieurs aux stocks objectifs. Alors que dans la deuxième période de 2012 à 2016, les stocks optimaux sont inférieurs aux stocks objectifs. Cela est justifié par les opérations la vidange de fond, réalisées pendant l'année 2012 avec un volume de 26Mm<sup>3</sup>

Pour le barrage de Foum El-Gherza on a constaté une irrégularité dans la satisfaction des demandes. Les stocks optimaux sont représentés dans la figure III.3.d.

On remarque qu'à partir des résultats de l'optimisation, on a pu offrir plus de quantité d'eau pour l'irrigation dans les années : 2008, 2013, 2015 et 2016, alors qu'ils n'avaient pas été réalisées par l'exploitant. De plus, on peut justifier le cas des lâchers historiques supérieurs à celles optimales par le souhait du gestionnaire de rattraper le manque d'eau pour les mois précédents en fournissant une quantité supérieure à l'objectif.

### **III. 5.1 Résultats de la simulation**

Les caractéristiques statistiques des données employées dans la procédure de la simulation pour chaque barrage sont récapitulées dans les tableaux III.6, III.7, III.8 et III.9

**Tableau III.6 :** Caractéristiques statistiques des données de la simulation pour le barrage de Boukourdane (en Mm<sup>3</sup>)

Phase	Période de la phase	Types de données		Caractéristiques statistiques				
				Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-Type
Apprentissage	Du Janvier 2005 au Décembre 2013	Données d'entrée	Apport	0,00	18,43	2,32	0,98	3,22
			Stock	22,93	57,78	38,41	38,21	8,23
			Demandes	0,02	4,53	1,50	18,04	1,61
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,00	1,80	0,66	0,45	0,71
Validation	Du Janvier 2014 au Décembre 2016	Données d'entrée	Apport	0,00	11,31	1,79	0,55	2,76
			Stock	25,15	49,01	35,92	36,04	6,56
			Demandes	0,02	4,53	1,50	18,04	1,61
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,00	1,80	0,66	0,45	0,71

**Tableau III.7 :** Caractéristiques statistiques des données de la simulation pour le barrage de Cheffia (en Mm<sup>3</sup>)

Phase	Période de la phase	Types de données		Caractéristiques statistiques				
				Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-Type
Apprentissage	Du Janvier 2003 au Décembre 2012	Données d'entrée	Apport	0,00	137,61	15,87	1,56	30,45
			Stock	44,74	155,68	112,31	114,68	26,26
			Demandes	0,00	15,00	4,16	2,50	4,75
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,00	1,80	0,65	0,45	0,71
Validation	Du Janvier 2013 au Décembre 2016	Données d'entrée	Apport	0,01	120,11	10,27	0,64	23,35
			Stock	34,35	146,69	96,39	92,28	28,31
			Demandes	0,00	15,00	4,16	2,50	4,75
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,00	1,80	0,65	0,45	0,71

**Tableau III.8 :** Caractéristiques statistiques des données de la simulation pour le barrage de Foum El-Gherza (en Mm<sup>3</sup>)

Phase	Période de la phase	Types de données		Caractéristiques statistiques				
				Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-Type
Apprentissage	Du Janvier 2007 au Décembre 2013	Données d'entrée	Apport	0	67,78	3,25	0,58	8,92
			Stock	0,32	14,89	7,65	6,77	4,49
			Demandes	1,77	9,30	4,77	3,31	2,69
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,00	3,75	0,97	0,75	1,03
Validation	Du Janvier 2014 au Décembre 2016	Données d'entrée	Apport	0,00	29,88	1,46	0,04	5,14
			Stock	0,05	14,12	5,35	4,83	3,73
			Demandes	1,77	9,30	4,78	3,31	2,69
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,00	3,00	0,68	0,37	0,87

**Tableau III.9 :** Caractéristiques statistiques des données de la simulation pour le barrage de Cheurfas II (en Mm<sup>3</sup>)

Phase	Période de la phase	Types de données		Caractéristiques statistiques				
				Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-Type
Apprentissage	Du Janvier 2008 au Décembre 2013	Données d'entrée	Apport	0,00	31,67	2,82	2,07	4,49
			Stock	6,61	55,09	28,36	26,93	11,09
			Demandes	1,00	6,00	2,75	2,25	1,85
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,50	5,00	1,91	9,27	1,70
Validation	Du Janvier 2014 au Décembre 2016	Données d'entrée	Apport	0,47	22,42	4,35	3,43	4,19
			Stock	23,06	48,67	41,44	45,26	7,33
			Demandes	1,00	6,00	2,75	2,25	1,85
		Données de sortie	Lâchers optimaux	0,50	5,00	1,91	9,27	1,70

Les résultats de la simulation effectuée par les réseaux de neurones, pour chaque barrage, sont récapitulés dans les tableaux III.10, III.11, III.12 et III.13

**Tableau III.10** : Indicateurs de performance des réseaux de neurones pour le barrage de Boukourdane

Nombre de Neurones dans les couches cachées		RMSE		Nash		R <sup>2</sup>
1 <sup>ère</sup> Couche	2 <sup>ème</sup> Couche	Apprentissage	Validation	Apprentissage	Validation	
6	6	4,83	2,41	98,87	99,72	0,80
6	9	4,94	2,83	98,82	99,61	0,82
6	12	4,89	2,57	98,84	99,63	0,81
9	6	4,88	2,95	98,85	99,58	0,81
9	9	4,74	2,81	98,91	99,62	0,82
9	12	4,81	2,97	98,88	99,57	0,81
12	6	4,91	3,93	98,83	99,24	0,80
12	9	4,83	3,51	98,91	99,41	0,81
12	12	4,80	4,25	98,89	99,12	0,82

Les résultats de la simulation représentés dans le tableau III.10, ont abouti que le meilleur réseau a des indicateurs de performance qui correspond : au nombre de Neurones, dans la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> Couche, égale à 9. Les valeurs de RMSE pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 4,74 et 2,81 respectivement. Les valeurs de Nash pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 98,91 et 99,62 respectivement. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> est de 0,82

**Tableau III.11** : Indicateurs de performance des réseaux de neurone pour le barrage de Cheffia

Nombre de Neurones dans les couches cachées		RMSE		Nash		R <sup>2</sup>
1 <sup>ère</sup> Couche	2 <sup>ème</sup> Couche	Apprentissage	Validation	Apprentissage	Validation	
9	9	8,96	9,05	99,77	99,65	0,92
9	12	8,71	8,96	99,39	99,98	0,91
9	15	9,03	8,13	99,84	99,23	0,92
12	9	9,14	8,43	99,33	99,72	0,92
12	12	8,80	8,28	99,41	99,28	0,93
12	15	8,94	8,62	99,41	99,84	0,92
15	9	9,17	8,53	99,41	99,22	0,91
15	12	9,75	8,76	91,09	99,66	0,92
15	15	8,92	8,12	99,35	99,87	0,91

Les résultats de la simulation représentés dans le tableau III.11, ont abouti que le meilleur réseau a des indicateurs de performance qui correspond : au nombre de Neurones, dans la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> Couche, égale à 12. Les valeurs de RMSE pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 8,8 et 8,28 respectivement. Les valeurs de Nash pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 99,41 et 99,28 respectivement. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> est de 0,93

**Tableau III.12 :** Indicateurs de performance des réseaux de neurones pour le barrage de Foug El Ghorza

Nombre de Neurones dans les couches cachées		RMSE		Nash		R <sup>2</sup>
1 <sup>ère</sup> Couche	2 <sup>ème</sup> Couche	Apprentissage	Validation	Apprentissage	Validation	
6	6	0,51	0,52	88,17	89,91	0,89
6	9	0,65	0,68	88,33	89,83	0,88
6	12	0,38	0,38	88,63	90,08	0,90
9	6	0,74	0,67	88,05	89,88	0,89
9	9	0,40	0,43	88,51	90,02	0,90
9	12	0,66	0,82	88,15	89,66	0,88
12	6	0,73	0,71	88,42	89,73	0,91
12	9	0,62	0,35	88,30	90,06	0,89
12	12	0,34	0,83	88,64	89,84	0,88

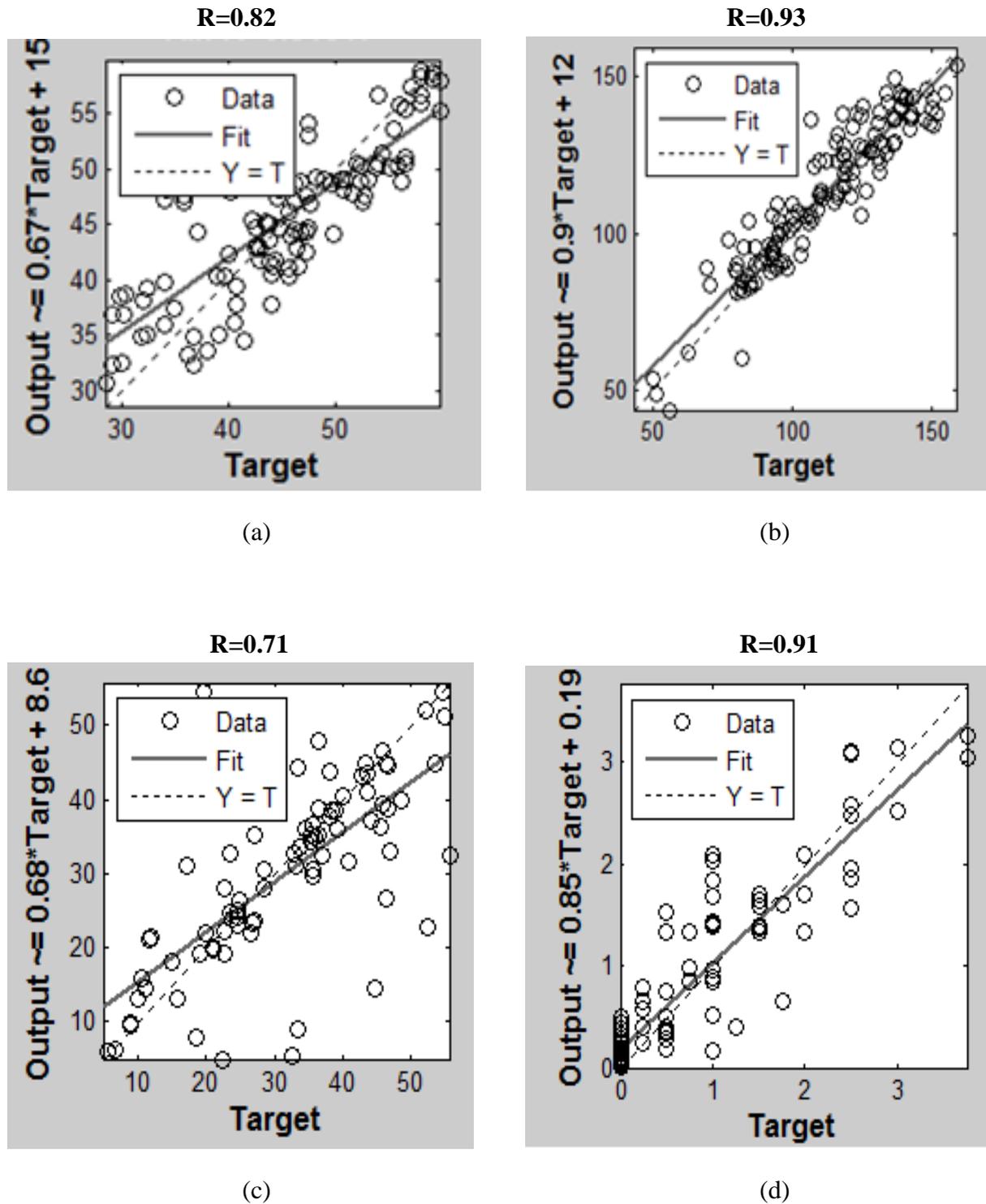
Les résultats de la simulation représentés dans le tableau III.12, ont abouti que le meilleur réseau a des indicateurs de performance qui correspond : au nombre de Neurones, dans la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> Couche, égale à 9. Les valeurs de RMSE pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 0,4 et 0,43 respectivement. Les valeurs de Nash pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 88,51 et 90,02 respectivement. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> est de 0,90

**Tableau III.13** : Indicateurs de performance des réseaux de neurones pour le barrage de Cheurfas II

Nombre de Neurones dans les couches cachées		RMSE		Nash		R <sup>2</sup>
1 <sup>ère</sup> Couche	2 <sup>ème</sup> Couche	Apprentissage	Validation	Apprentissage	Validation	
12	12	9,45	12,23	89,65	83,31	0,68
12	18	9,73	12,55	89,76	83,56	0,70
12	24	9,36	12,15	89,45	83,43	0,68
18	12	9,87	12,48	89,88	83,77	0,69
18	18	9,52	12,81	91,13	83,42	0,67
18	24	9,38	12,44	89,94	83,86	0,70
24	12	9,61	12,38	89,79	83,84	0,68
24	18	9,56	12,27	89,88	83,67	0,67
<b>24</b>	<b>24</b>	<b>9,85</b>	<b>12,76</b>	<b>91,09</b>	<b>83,98</b>	<b>0,70</b>

Les résultats de la simulation représentés dans le tableau III.13, ont abouti que le meilleur réseau a des indicateurs de performance qui correspond : au nombre de Neurones, dans la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> Couche, égale à 24. Les valeurs de RMSE pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 9,85 et 12,76 respectivement. Les valeurs de Nash pour les phases d'apprentissage et de validation sont égales à 91,09 et 83,98 respectivement. Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> est de 0,70

Les relations entre les stocks simulés par les réseaux de neurone (*Outputs*) avec ceux tirés par la programmation dynamique (*target*) sont présentées dans la figure III.4.



**Figure III.4** Relation entre valeurs simulés et optimisés pour les barrages :  
 (a) Boukourdane, (b) Cheffia, (c) Cheurfas II et (d) Foum El-Gherza

### III. 6. EVALUATION DE LA SATISFACTION DE LA DEMANDE

Les objectifs principaux de cette étude est bien entendu d'optimiser la satisfaction de la demande en eau pour l'irrigation, tout en garantissant les demandes pour l'AEP et l'industrie. En contrepartie, il est intéressant de garder le niveau d'eau dans le barrage proche d'un niveau objectif. Le taux de satisfaction pour chaque barrage est récapitulé dans le tableau III.14.

**Tableau III.14** Taux de satisfaction par optimisation pour chaque barrage

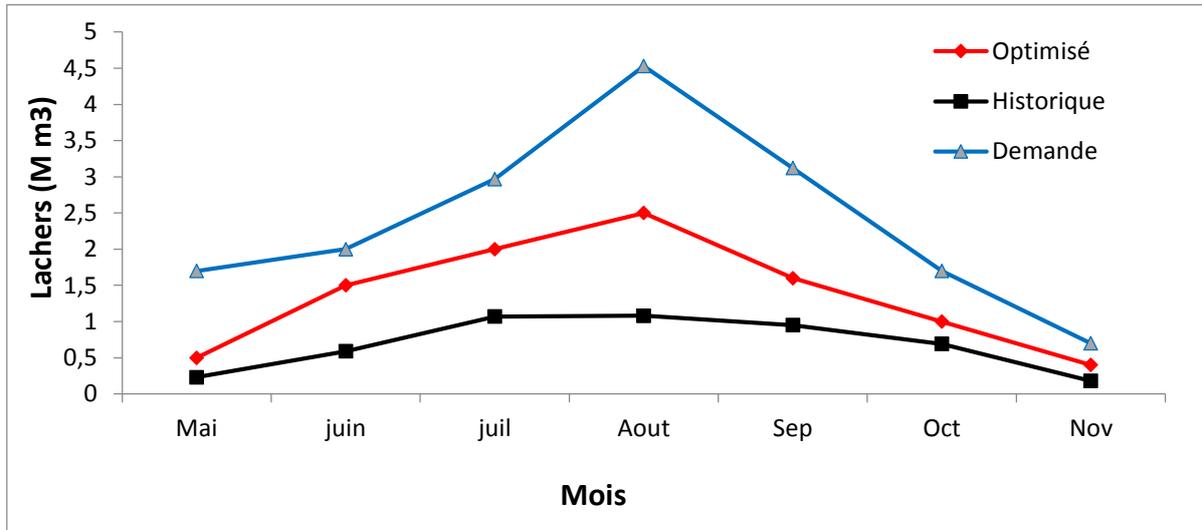
Barrage	Taux de Satisfaction (%)	
	Lâchers historiques	Lâchers optimisés
Boukourdane	24,19	60,00
Cheffia	49,47	80,00
Cheurfas II	40,83	70,00
Foum El-Gherza	14 ,54	21 ,45

D'après le tableau III.14, on constate une nette augmentation du taux de satisfaction pour les barrages de Boukourdane (de 24,19% à 60%), Cheffia (de 49,47% à 80%) et Cheurfas II (de 40,83% à 70%). Cette augmentation est due à la conservation des apports dans les périodes de crues, pour les exploiter dans les périodes suivantes où il y aura un manque d'eau. C'est une stratégie qui n'était pas suivie par les gestionnaires.

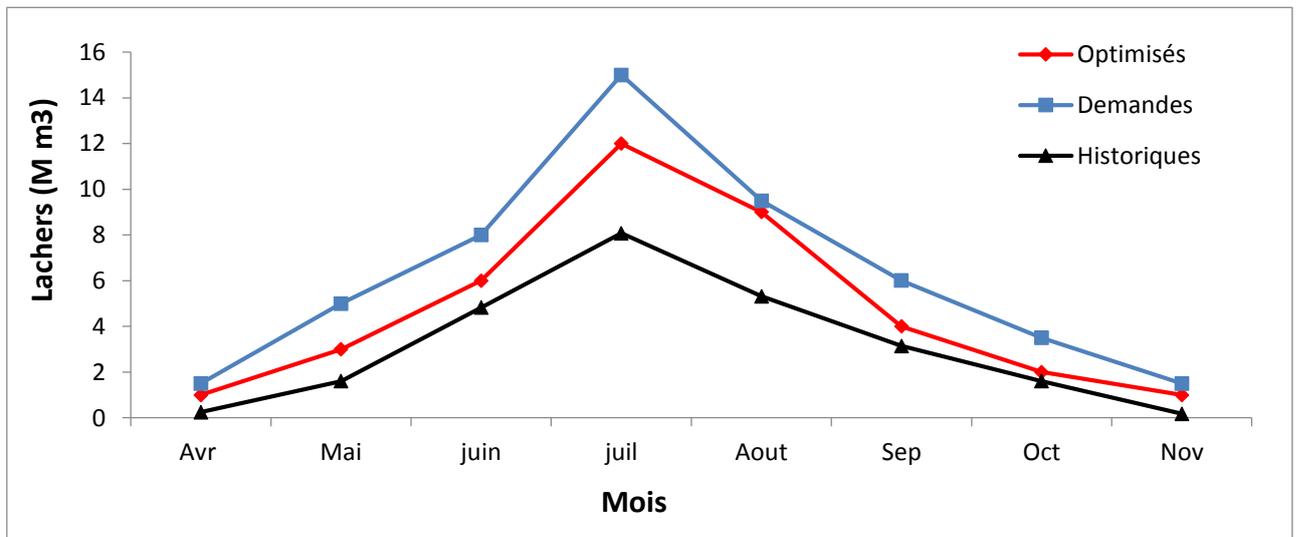
Pour le cas du barrage de Foum El-Gherza, on a enregistré une faible augmentation du taux de satisfaction, de 14 ,54 à 21,45 %, ce qui ne répond pas à nos attentes.

Face à cette situation, on a mené une étude approfondie pour traiter le problème de l'envasement qui avait un impact très considérable sur la gestion du barrage de Foum El-Gherza, et qui sera l'objet du prochain chapitre.

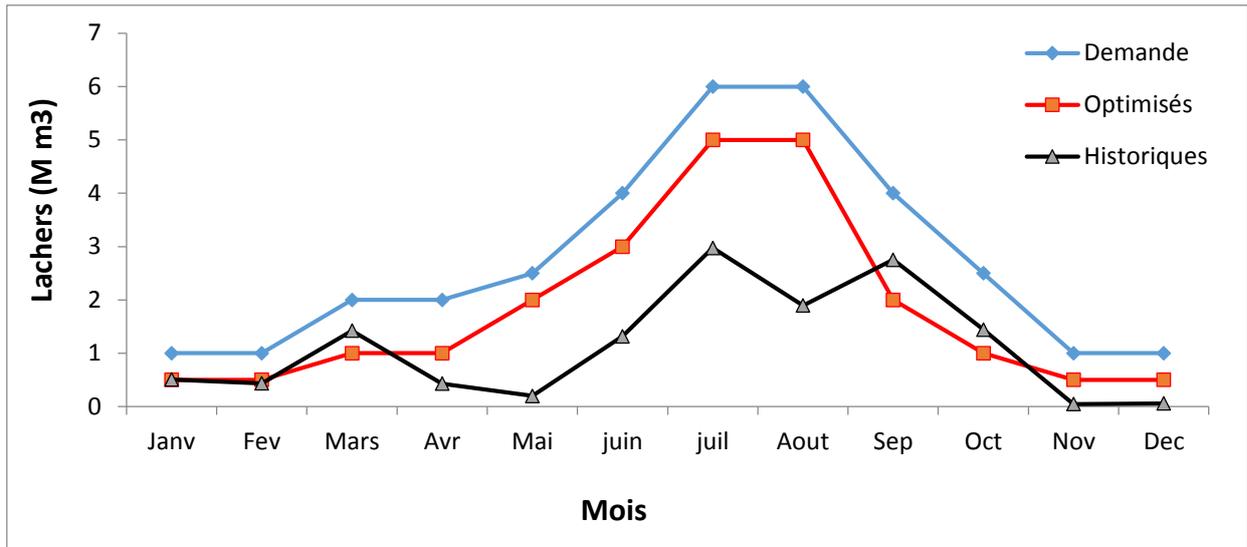
Les courbes de règle de gestion optimales obtenues par PDDNN pour les différents barrages sont représentées dans la figure III.5



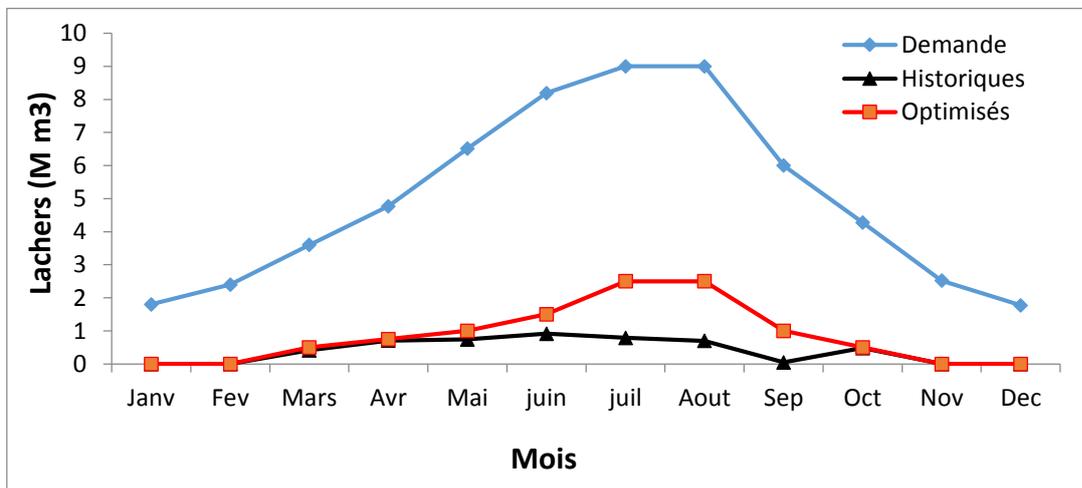
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III. 5 : Courbe de règle de gestion optimales obtenues par PDDNN. (a) Boukourdane, (b) Cheffia, (c) Cheurfa II et (d) Foug el-Gherza

D’après la figure III. 5, on peut remarquer que les lâchers optimaux mensuels obtenus par l’optimisation, pour l’ensemble des barrages, sont supérieurs à ceux fournis par les gestionnaires (historiques), à l’exception pour le barrage de Foug el-Gherza. Cela peut être justifié par la préservation de l’eau dans réservoirs pendant les mois de Mars, Septembre et Octobre, afin de l’exploiter pendant les mois de forte consommation. Aussi, on peut enregistrer que les lâchers optimaux n’ont jamais atteint les demandes. L’écart entre ces deux lâchers est plus large pour les cas du barrage de Foug el-Gherza. Ce qui signifie que la procédure de l’optimisation n’a pas pu améliorer la gestion de ce barrage.

## Conclusion

L'optimisation de la gestion des barrages choisis a été réalisée par la technique de programmation dynamique combinée aux les réseaux de neurones (DPNN), afin de tirer les règles d'exploitation optimales.

Les résultats de l'optimisation obtenus sont très satisfaisants, puisqu'on a pu améliorer le taux de satisfaction de la demande de 47, 49 et 49% jusqu'à 90, 60 et 70% pour les barrages de Cheffia, Boukourdane et Cheurfas II respectivement. À partir des courbes de règle de gestion optimales obtenues par la procédure de l'optimisation, on a pu remarquer que les lâchers optimaux mensuels, pour l'ensemble des barrages, sont supérieurs à ceux fournis par les gestionnaires (historiques). Aussi, on a pu enregistrer que les lâchers optimaux n'ont jamais atteint les demandes.

Pour le barrage de Foum El Gherza, la procédure d'optimisation montre que le taux de satisfaction est augmenté à l'ordre de 47%. Ce résultat qui apparait décevant a été influencé d'une part, par des périodes successives de sécheresses qui a connu la région, et d'autre part, du problème de l'envasement.

## **CAPITRE IV**

# **STRATEGIES DE LA GESTION DES SEDIMENTS DANS LE BARRAGE DE FOUM EL-GHERZA**

## Introduction

Le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose, aux exploitants des barrages, des problèmes de degré plus avancé. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue, mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, et dans certains cas, exige que la retenue soit hors service. La projection des stratégies efficaces, face au problème de l'envasement, devient une opération obligatoire pour prolonger la durée de vie des barrages (Schleiss et *al*, 2016).

### IV. 1. ETAT D'ENVASEMENT DES BARRAGE EN ALGERIE

L'Algérie figure parmi les contrées les plus dangereusement menacées par l'érosion et l'envasement des retenues. Le climat est très agressif avec des pluies très irrégulières. Les pluies torrentielles sont fréquentes en automne, avec des intensités dépassant souvent 45 mm/h, au moment où la couverture végétale est absente, engendrant, en des temps de concentrations des eaux très courts, des crues fortes, rapides et chargées de sédiments. (Touaibia, 2010).

La figure IV.1 représente la carte de sensibilité à l'envasement des barrages en Algérie.

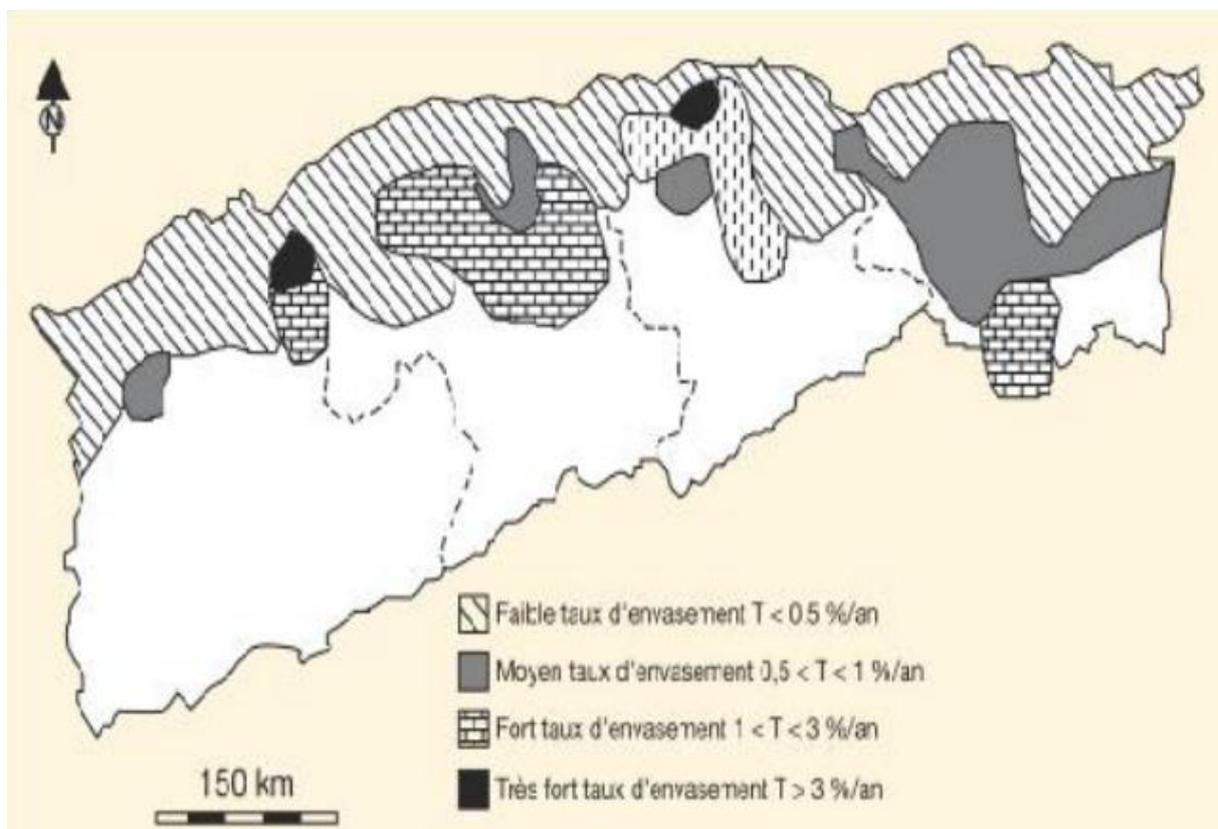


Figure IV.1 Carte de sensibilité à l'envasement des barrages en Algérie (Remini, 2005).

La sédimentation des barrages en Algérie est parmi les plus élevées au monde. Les crues drainent d'énormes quantités de boue vers les barrages. Avec un volume de 65 millions de m<sup>3</sup>, la situation de ces barrages devient plus critique. L'évolution du taux de comblement des barrages est mentionnée dans le tableau IV.1

Tableau IV.1 Evolution du taux d'envasement des barrages en Algérie

Année	Volume de vase (Milliard m <sup>3</sup> )	Capacité totale de stockage (Milliard m <sup>3</sup> )	Taux d'envasement (%)
2002	0,90	5,29	17,00
2006	1,10	6,80	16,00
2009	1,30	8,00	16,25
2014	1,60	8,00	20,00
2020	1,27	8,47	15,00

(Source : ANBT, 2021)

Selon des estimations prévisionnelles, l'envasement peut atteindre en 2025 un volume de 1,4 milliards m<sup>3</sup> pour les barrages en exploitation, qui correspondra à 18,05 % de la capacité totale de stockage (ANBT, 2021).

Le taux d'envasement des barrages les plus envasés en Algérie est mentionné dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 Taux d'envasement des barrages en Algérie.

Barrage	Date de construction	Capacité initiale (Million m <sup>3</sup> )	Taux d'envasement (%)
Fergoug	1970	18,00	94,33
Bouhanifia	1945	73,00	52,72
Brézina	1990	120,00	61,03
Sidi M'Hamed Ben Aouda	1978	235,00	48,00
Ghrib	1939	280,00	39,52
Oued-Fodda	1932	226,00	62,04
Beni-Amrane	1988	16,00	48,97
Boughzoul	1934	55,00	63,15
K'sob	1877	29,50	52,95
Zardezas	1945	31,00	57,69
Foum.El.Gueiss	1939	3,00	85,67
Mexa	1998	47,00	53,51
Foum.El.Gherza	1950	47,00	68,32

(Source : ANBT, 2021)

## IV. 2. ENVASEMENT DU BARRAGE DE FOU M EL-GHERZA

Le barrage de Foum El Gherza est d'une grande importance économique régionale. Malheureusement, il est classé parmi les barrages les plus envasés de l'Algérie. Face à ce problème qui a affecté considérablement son exploitation, l'ouvrage ne pourra pas satisfaire les besoins en irrigation des palmeraies à court et à moyen terme.

### IV. 2.1. Processus de l'envasement du barrage de Foum El-Gherza

Les crues d'oued El Abiod sont torrentielles et dévastatrices charriant des troncs de palmiers et des cadavres d'animaux. Les quantités de terre érodées au niveau du bassin versant et les berges de l'oued sont drainées par le cours d'eau vers le barrage. Généralement, c'est en période du printemps (Mars et Avril) que les courants de densité font leur apparition à l'entrée de la retenue du barrage de Foum El Gherza.

Le contact entre l'eau chargée et l'eau claire déclenche la formation et la propagation du courant de densité après un parcours de 5 km (Figure IV.2). En trouvant la vanne fermée, il butte contre la digue, se stabilise et se décante.

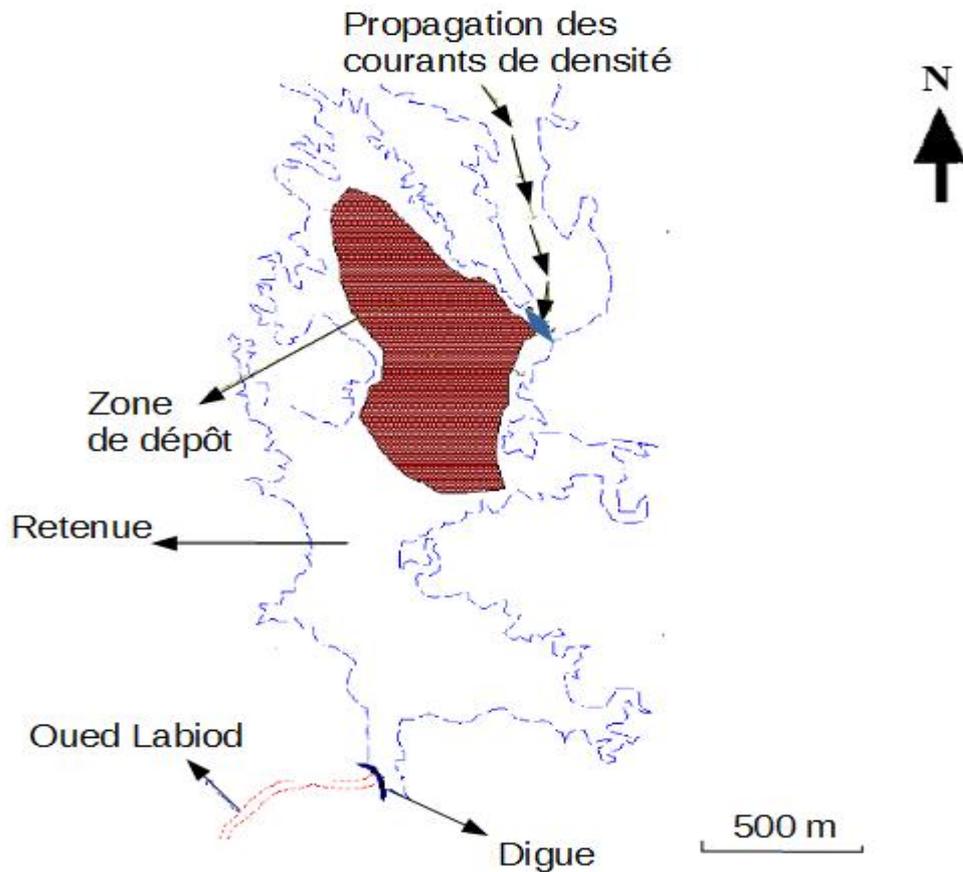


Figure IV.2 : Zone de dépôt des particules fines dans la retenue du barrage de Foum El-Gherza (Remini et Maazouz, 2018).

#### IV. 2.2. Evolution du taux de l'envasement du barrage de Foum El-Gherza

Depuis sont mise en exploitation en 1950, une quantité de 40 millions de m<sup>3</sup> de vase s'est déposée dans la retenue, soit un taux de comblement de 85% de la capacité initiale.

L'étude de Tebbi (2012) a donné une relation entre le débit solide (Q<sub>s</sub>) et le débit liquide (Q<sub>t</sub>) représentée par :

$$Q_s \text{ (hm}^3\text{)} = 0,0033 Q_t^{1,63} \text{ (hm}^3\text{)} \quad (\text{IV.1})$$

Avec un coefficient of détermination  $R^2 = 0,96$

Les rapports des campagnes bathymétriques effectuée en : 1967, 1975, 1986, 1993, 2001, 2004 et 2007, ont montré que l'évolution de la quantité de la vase déposée au fond du barrage de Fom El Gherza (tableau IV.3) est augmentée d'une manière très considérable,

Tableau IV.3 Evolution de la quantité de la vase déposée au fond du barrage de Fom El-Gherza

Année	Volume de vase (Mm <sup>3</sup> )
1967	12
1975	16
1986	21
1993	24
2001	31
2004	33
2007	35

(Source : ANBT, 2021)

### IV. 3. STRATEGIES DE LA GESTION DES SEDIMENTS DU BARRAGE DE FOU M EL-GHERZA

Pour des solutions préventives, des tentatives de reboisement et des corrections torrentielles ont été appliquées sur le bassin versant du barrage de Fom El Gherza. En parallèle, des opérations de dévasement du barrage de Fom El Gherza ont commencé depuis 1950, date de sa mise en eau. Deux modes de dévasement ont été opérés au niveau du barrage, qui sont : le soutirage des courants de densité et le dévasement par dragage.

### IV. 3.1. Soutirage des courants de densité du barrage de Foug El-Gherza

La technique de soutirage des courants de densité a été réalisée dans plusieurs cas des barrages en Algérie. Cette technique était très efficace pour le cas des barrages d'Ighil Emda et d'Erraguene. Avec un rendement de 55%, la durée de vie du barrage d'Ighil Emda a triplé.

Pour le cas du barrage de Foug El Gherza, l'ouvrage de vidange est équipé d'une vanne de fond carrée de dimensions de 3.3 m de largeur et de 3.3 m de hauteur (figure IV.3). Elle est localisée à la cote de 149.25, et peut évacuer 100 m<sup>3</sup>/s sous un niveau à la cote normale.

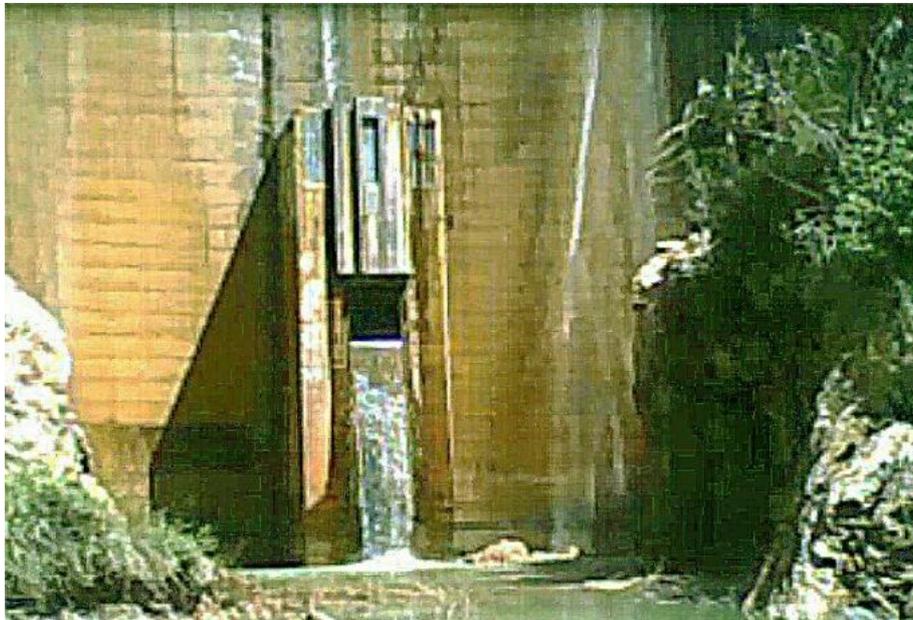


Figure IV.3 Vanne de fond du barrage de Foug El Gherza (ANBT, 2021)

Le soutirage des courants de densité a permis d'évacuer 40 millions de m<sup>3</sup> de boue depuis 1950. Le volume évacué par les opérations de la vidange du fond est représenté dans la figure IV.4

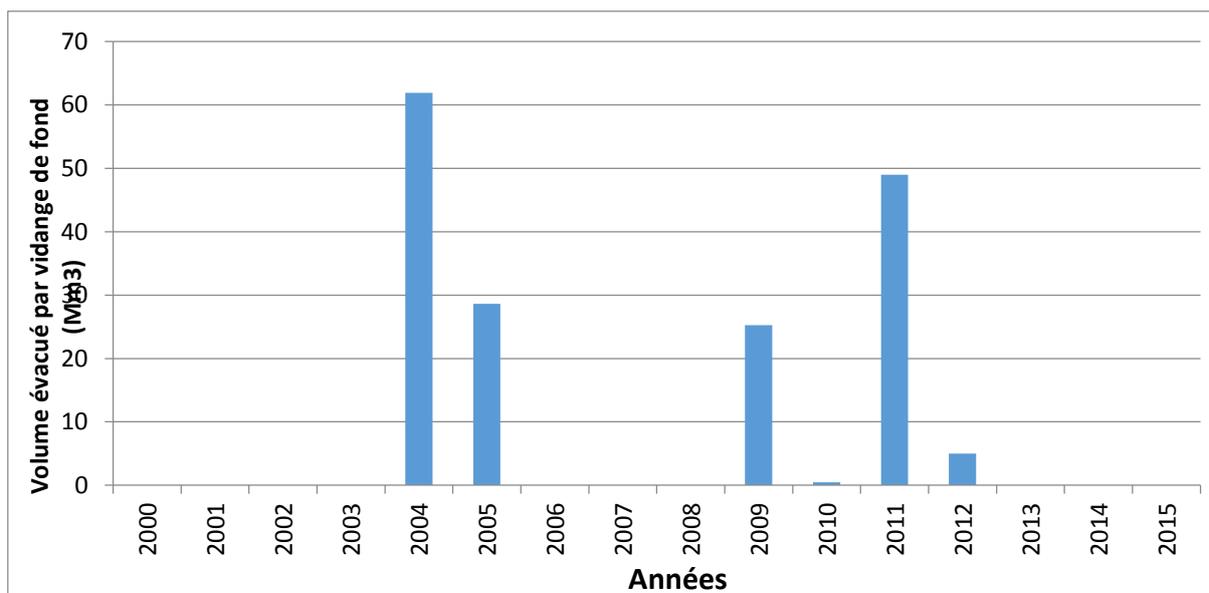


Figure IV. 4 : Volume évacué par la vidange de fond du barrage de Foug El Gherza

Il est à noter que l'ouverture de pertuis de vidange du barrage de Foug El Gherza s'effectue très en retard par rapport à l'arrivée de la crue. Dans ce cas, on enregistre un dépôt important de vase et l'évacuation d'une suspension très dense. De vue pratique une telle opération demande beaucoup d'attention. A titre d'exemple, plusieurs fois, la vanne n'arrive pas à se fermer faute de blocage par un tronc de palmier.

La crue de l'année 2004, avec un apport d'environ de 122 millions de m<sup>3</sup> d'eau a été enregistré dans le barrage de Foug El Gherza. Cependant, environ 5 millions de m<sup>3</sup> de suspension ont été évacué par la vanne de fond. Soit un rapport de 3.5% entre les rejets et les apports, une valeur jugée très faible. Face à cette situation, les gestionnaires du barrage ont planifié un programme pour étudier le mécanisme des courants de densité dans le but d'augmenter la quantité des sédiments. Lors de la crue de l'année 2009, un volume maximum a été évacué par les pertuis de vidange égale à 35 millions de m<sup>3</sup>, avec un apport d'eau enregistré au barrage égale à 100 millions de m<sup>3</sup>, soit un rapport de 35%.

Notons aussi, que la méconnaissance du phénomène des courants de densité et du comportement des vases dans les réservoirs, qui fut la principale cause de cet échec, à causer l'obturation de la vanne de vidange du barrage de Foug El Gherza en 1982. Ce cas est même enregistré dans le cas de barrages d'Oued El Fodda en 1948, et du barrage de Cheurfa I en 1966. Ce dernier a été totalement abandonné.

### IV. 3. 2. Opérations de dragage dans le barrage de Foug El-Gherza

L'histoire du dragage des barrages Algériens remonte en 1959. C'était la première opération de dragage opérée sur le barrage de Cheurfa 1, dans le but d'évacuer 8,5 millions de m<sup>3</sup>. Jusqu'à 2019, environ 12 opérations de dragages ont été réalisées sur 10 barrages en Algérie. Ces opérations ont permis l'enlèvement d'un volume de vase de 170 millions de m<sup>3</sup>

Pour le cas du barrage de Foug El Gherza, la première opération de dragage réalisée a été commencée en Mars 2005. Pour une durée de 24 mois, l'objectif de cette opération est d'évacuer 4 millions de m<sup>3</sup> de vase déposée dans le fond de la retenue.

Le type de dragage projeté est hydraulique avec une drague suceuse aspiratrice refouleuse à désagrégateur (Figure IV. 5).



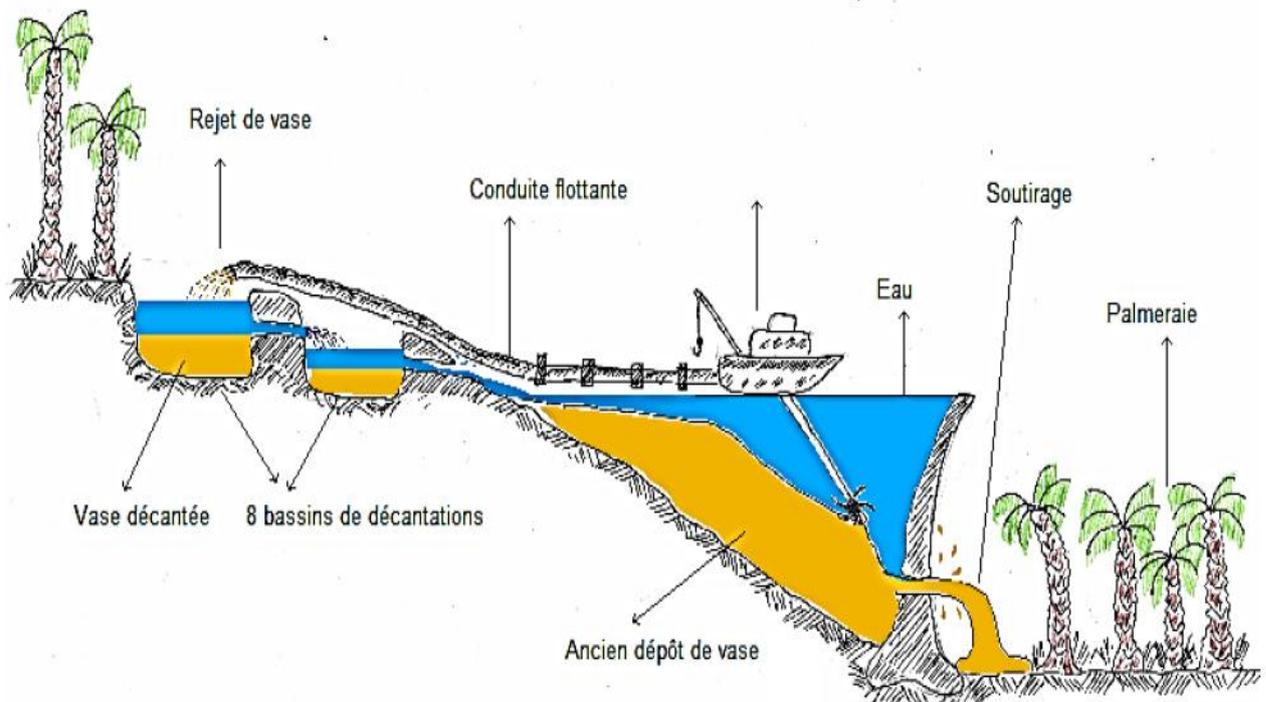
**Figure IV. 5** Opération de dragage du barrage de Foug el Gherza (ANBT, 2021)

L'opération de dragage consiste à aspirer les sédiments à travers une pompe centrifuge. Ces dragues sont optimisées pour des fonds constitués de vase, de sable, de gravier et d'argile doux. La drague aspiratrice à désagrégation est utilisée lorsque les fonds sont plus fermes.

Elle est équipée d'un dispositif rotatif en bout d'élinde qui lui permet de broyer les matériaux pour permettre leur aspiration. L'organe d'aspiration est porté par un long tube appelé 'élinde' qui est articulé pour pouvoir être ramené à bord.

Les sédiments dragués sont ainsi extraits sous forme de boue liquide, et sont ensuite rejetés dans des bassins de stockage à 1.5km de l'amont du Barrage (Figure IV. 6).

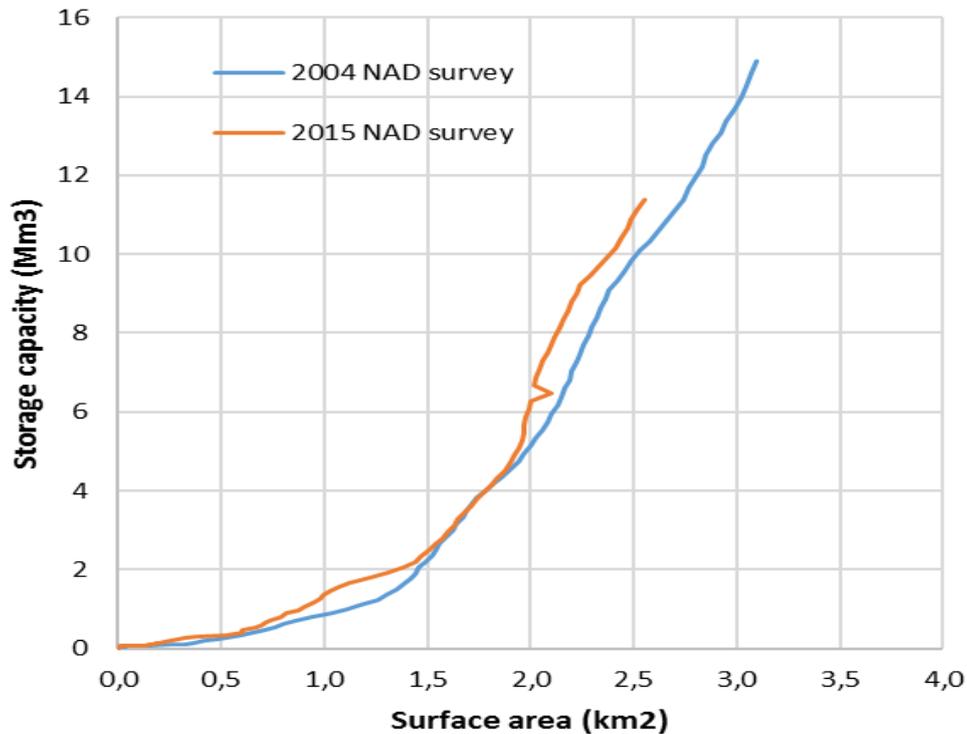
Les huit bassins de décantation sont répartis en cascade, suivant une légère pente topographique de manière à ce que l'eau soit drainée d'un bassin à l'autre et jusqu'à arriver au plan d'eau. Les bassins de stockage sont entremêlés de tuyaux de 750mm de diamètre permettant un drainage efficace de l'eau vers le prochain bassin mitoyen, la vase est ainsi rejetée, décantée et stockée dans un des huit bassins.



**Figure IV. 6** Schéma explicatif d'une opération de dragage dans un barrage (Remini, 2018)

Lors de cette opération, les travaux de dévasement de la première tranche (année 2005) ont permis l'enlèvement d'un volume de vase de  $0,89 \text{ hm}^3$  soit 2,77 % de la capacité de stockage. En 2006 la quantité dévasée est de  $3,61 \text{ hm}^3$  correspond à 11,21 %. Achevée en 2007 avec un volume dévasé de  $0,36$  soit 1,13 %, l'opération de dragage a permis d'éliminer en total un volume de  $4,86 \text{ hm}^3$  qui correspond à 15,11 % de la capacité de stockage du barrage de Fom El Gherza.

Le suivi de l'état d'envasement du barrage de Foum El Gherza, lors des années suivant la stratégie de dragage, a été l'objet d'une étude menée par les services de l'ANBT. Le rapport de la campagne bathymétrique réalisée en 2014 a abouti que le taux de comblement de la retenue a atteint les 89% (figure V.7). Dans ces circonstances, une deuxième opération de dragage en 2015. L'objectif de cette opération est de draguer une quantité de 8 millions de m<sup>3</sup> de vase en 21 mois. En raison du stress hydrique et l'absence des apports, les cinq millions de m<sup>3</sup> d'eau stockée dans la réserve du barrage restent insuffisantes pour mener une bonne opération de dragage. Dans ce cas il faut attendre à ce que la quantité d'eau dans la réserve atteint un niveau acceptable qui permet le bon déroulement du dragage.



**Figure IV.7** Evolution de la capacité de stockage du barrage de Foum El Gherza.  
(Source, ANBT 2021)

**Conclusion**

L'envasement des barrages est l'un des grands problèmes hydrauliques qui menace les infrastructures hydrotechniques dans de nombreux pays du monde. Le barrage de Foum El-Gherza fait partie de la classe parmi les barrages les plus envasés de l'Algérie. Depuis sa mise en exploitation en 1950, une quantité de 40 millions de m<sup>3</sup> de vase s'est déposée dans la retenue, soit un taux de comblement de 85% de la capacité initiale.

Face à ce problème, les responsables du barrage ont adopté des techniques de dévasement, tel que le soutirage des courants de densité et le dévasement par dragage, pour améliorer l'exploitation et augmenter sa durée de vie. La première technique a permis d'évacuer 40 millions de m<sup>3</sup> de boue depuis 1950. Son inconvénient apparaît dans la méconnaissance du phénomène des courants de densité et du comportement des vases dans les réservoirs, qui a causé l'obturation de la vanne de vidange.

De ce fait, les gestionnaires du barrage ont réalisé une première opération de dragage (2005) qui a permis d'éliminer un volume de 4,86 hm<sup>3</sup>, correspond à 15,11 % de la capacité de stockage. De plus que le rapport de la campagne bathymétrique réalisée en 2014 a abouti que le taux de comblement de la retenue a atteint les 89%, une deuxième opération de dragage a été lancée en 2015. L'objectif de cette opération est de draguer une quantité de 8 Mm<sup>3</sup> de vase en 21 mois.

## **CHAPITRE V**

### **INFLUENCE DES STRATEGIES DE LA GESTION DES SEDIMENTS SUR L'EXPLOITATION DU BARRAGE DE FOUM EL-GHERZA**

## Introduction

Ce chapitre est consacré pour étudier la performance des stratégies de la gestion des sédiments sur l'exploitation du barrage de Foug El-Gherza. Par l'application de la DPNN (même démarche que le chapitre 3), l'objectif principal est de déterminer les lâchers d'eaux optimaux pour deux stratégies. La première concerne l'opération de dragage pendant la période de janvier 2005 à décembre 2008 et la deuxième stratégie est celle du soutirage des courants de turbidité pendant la période de janvier 2009 à décembre 2013.

L'addition du troisième scénario (cas de Non stratégie) va donner une meilleure compréhension sur l'influence des stratégies de la gestion des sédiments sur l'exploitation du barrage de Foug El-Gherza.

### V. 1. RESULTATS DE L'OPTIMISATION

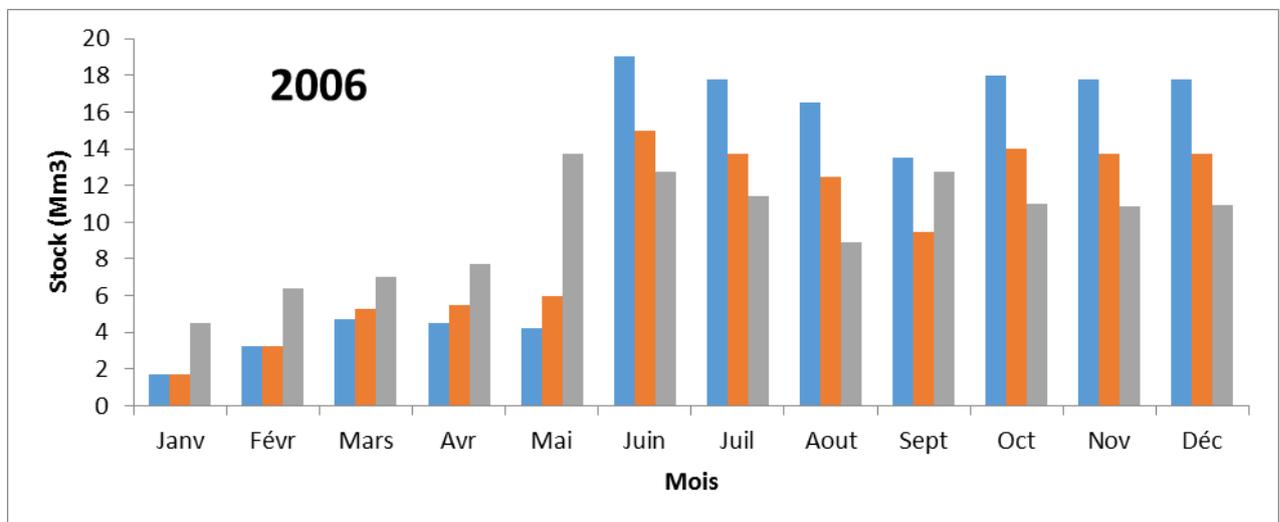
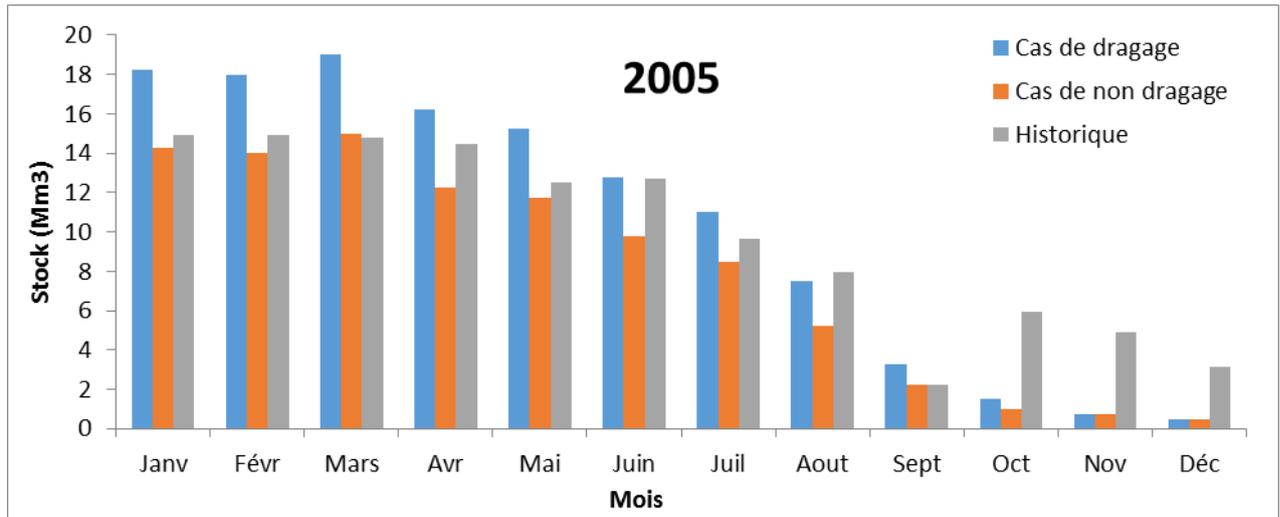
Les résultats de la simulation par les réseaux de neurone sont récapitulés dans le tableau V.1.

Tableau V.1. Indicateurs de performance des meilleurs réseaux de neurone

Caracteristiques du réseau	Non stratégie	Opération de dragage	Soutirage des courants de turbidité
Epochs	2000	2000	2000
Nombre de neurone 1 <sup>ère</sup> Couche cachée	9	9	9
Nombre de neurone 2 <sup>ème</sup> Couche cachée	9	9	9
RMSE d'apprentissage	0,12	0,22	0,28
RMSE de validation	0,24	0,26	0,29
Nash d'apprentissage	97,25	93,91	91,54
Nash de validation	87,30	92,44	85,07
R <sup>2</sup>	0,95	0,95	0,92

V. 1.1. Stocks optimaux

La figure V.1 représente les volumes des stocks optimaux obtenus par la DPNN pour le cas de l'opération de dragage réalisée pendant la période de janvier 2005 à décembre 2008 dans le barrage de Foug El-Gherza



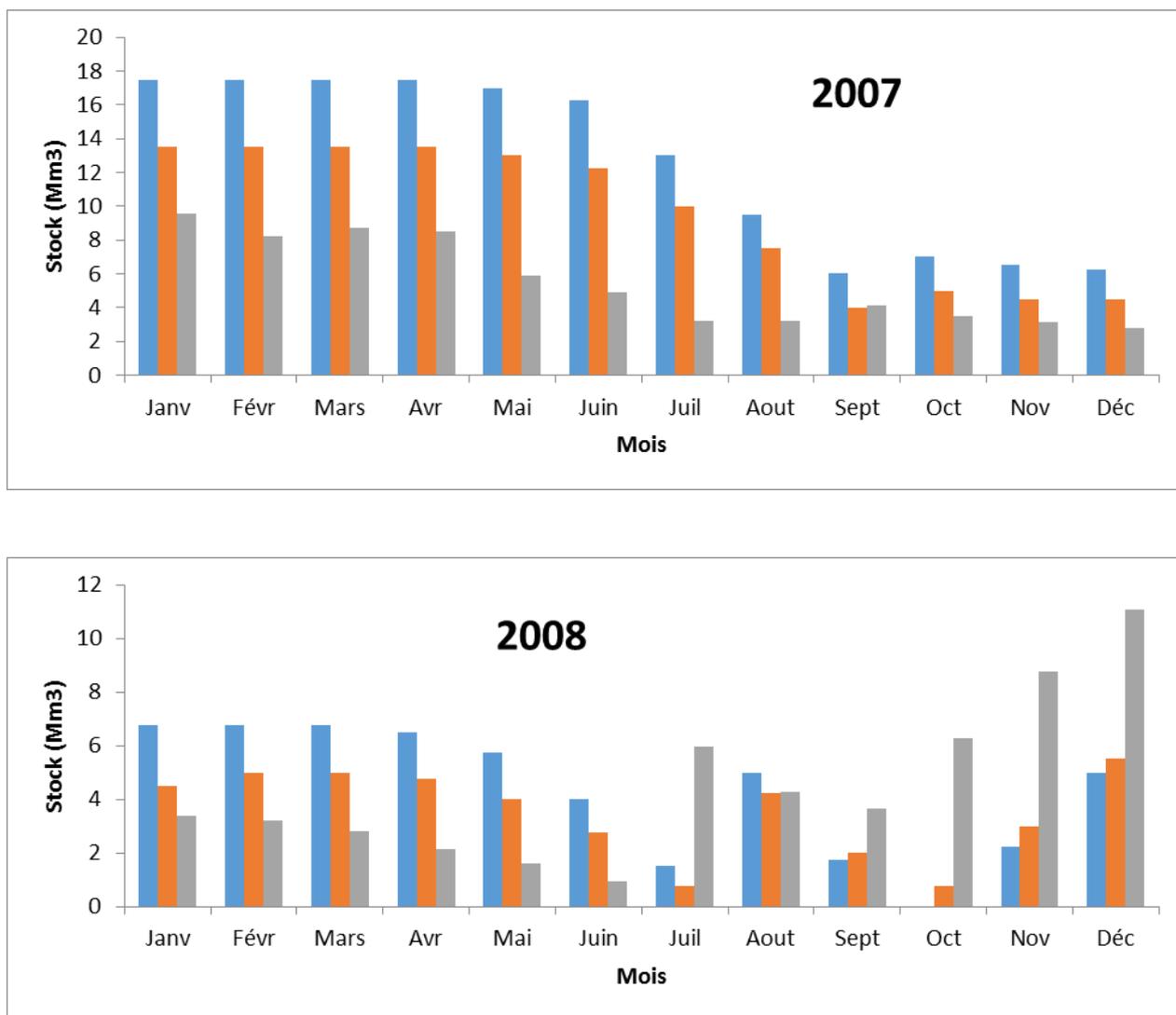
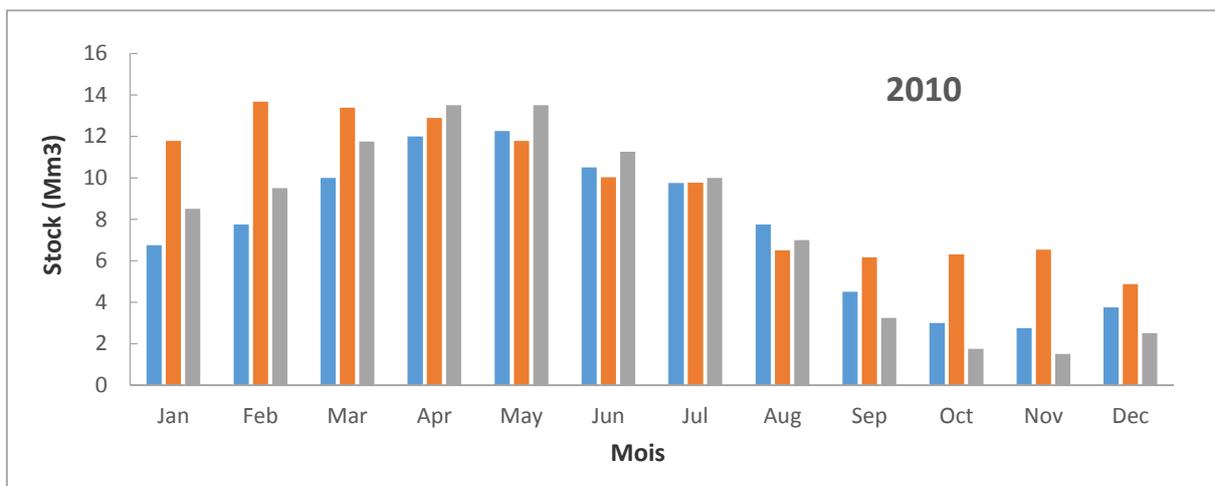
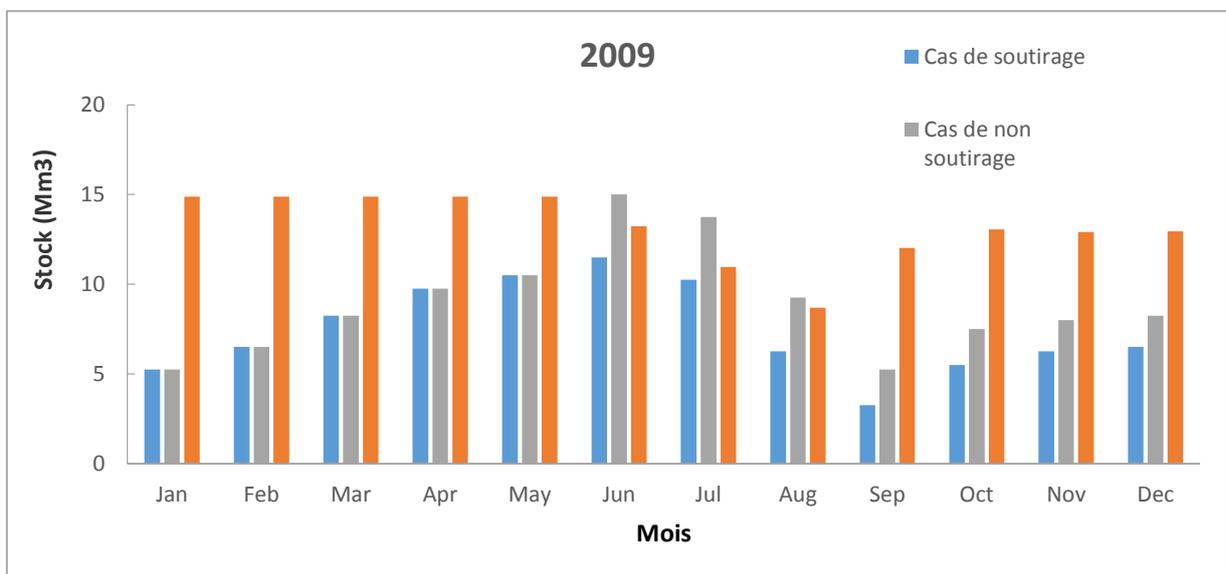


Figure V.1 Volumes des stocks optimaux pour le cas de l'opération de dragage

La figure V.1 montre qu'au cours de l'année 2005, les volumes des stocks optimaux obtenus lors de l'opération du dragage sont supérieurs à ceux obtenus dans le cas du non dragage. Ainsi, on remarque que les volumes des stocks projetés par les gestionnaires du barrage de Foug El-Gherza sont inférieurs à ceux des volumes optimaux, sauf pour octobre à décembre 2005. Ils sont aussi supérieurs à ceux des volumes optimaux obtenus dans le cas de sans dragage, tout au long de l'année, ce qui traduit que l'opération de dragage est un procédé bénéfique car elle a permis d'augmenter la quantité d'eau stockée dans le réservoir.

Pour l'année 2006, la figure V.1 montre que les volumes des stocks optimaux obtenus pour le cas de l'opération du dragage étaient inférieurs à ceux obtenus dans le cas du troisième scénario. Cependant, la situation s'est inversée pendant la période de mai 2006 à juillet 2008, en raison de l'effet des soutirages réalisés lors des deux crues majeures (la première avec un apport de 28,52 millions de m<sup>3</sup> et la deuxième avec un apport de 6,77 millions de m<sup>3</sup>). Par la suite, la situation est revenue aux conditions initiales jusqu'à la fin de l'année 2008.

La figure V.2 représente les volumes des stocks optimaux obtenus par la DPNN pour le cas de l'opération du soutirage des courants de turbidité réalisée pendant la période de janvier 2009 à décembre 2013 dans le barrage de Foug El-Gherza



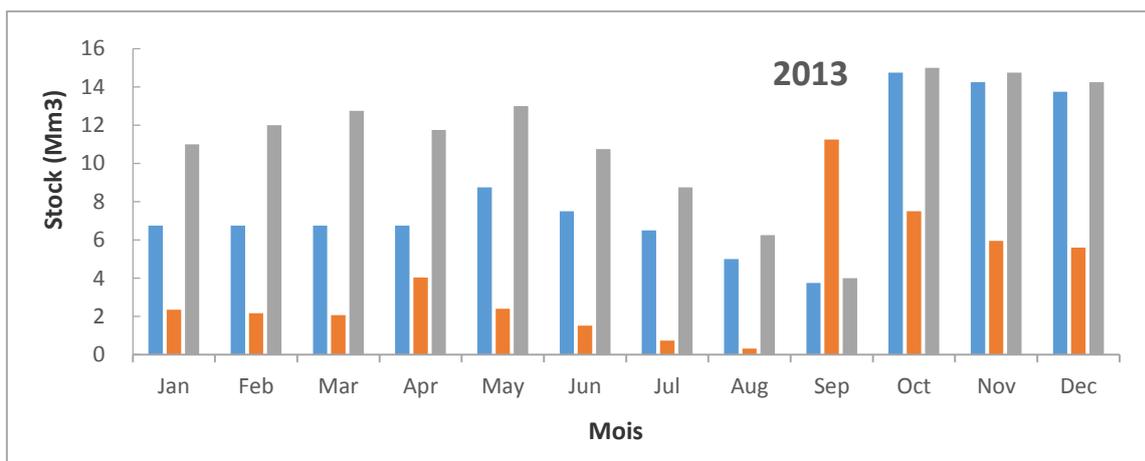
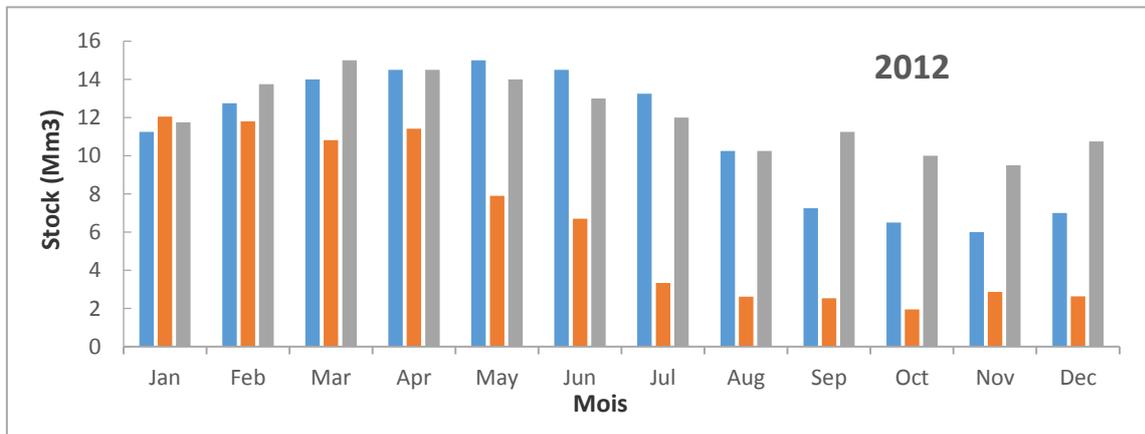
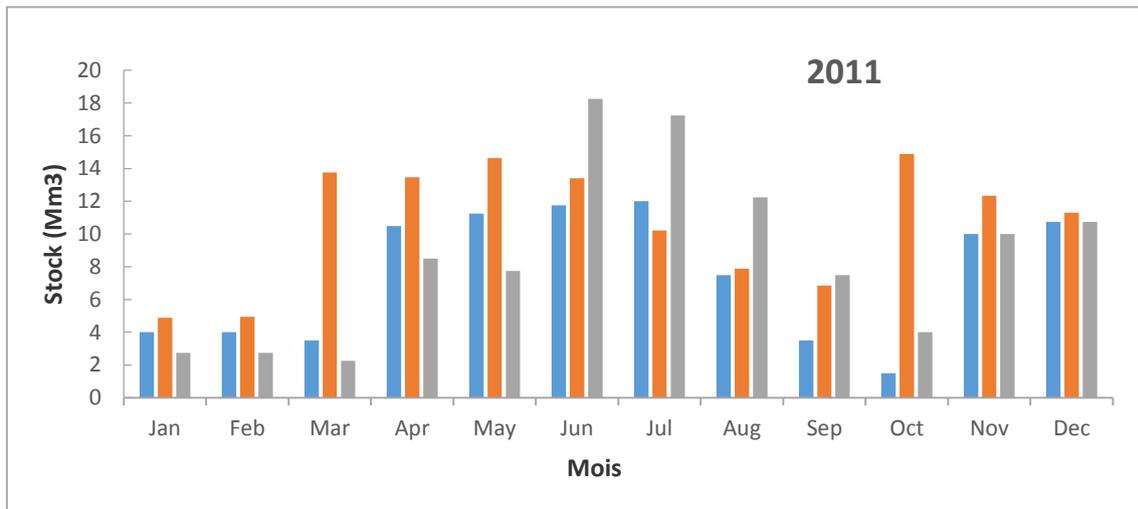


Figure V.2 Volumes des stocks optimaux pour le cas de l'opération du soutirage des courants de turbidité

La figure V.2 montre que, durant l'année 2009, les volumes des stocks optimaux obtenus par la technique de PDNN pour le cas de l'opération du soutirage des courants de turbidité sont inférieurs aux volumes des stocks projetés par les gestionnaires chargés de l'exploitation du barrage de Foum El-Gherza. L'écart entre les deux volumes était plus faible durant les années 2010 et 2011, à l'exception des mois de mars et d'octobre. Cependant, la situation s'est inversée pour les années 2012 et 2013, où les volumes de stocke optimaux devient supérieurs. Cela peut être justifié que le modèle retenu donne la priorité d'augmenter les lâchers pendant les mois où les demandes sont les plus élevées, toute en évitant l'accumulation des sédiments par les opérations de soutirage, ce qui fait augmenter le volume actif du barrage.

**V. 1.2. Lâches optimaux et taux de satisfaction**

Le tableau V.2 mentionne les lâchers optimaux, les taux de satisfaction et les quantités d'eau économisée pour les différentes stratégies de la gestion des sédiments réalisées dans le barrage de Foum El-Gherza.

Tableau V.2 Taux de satisfaction des lâchers pour les deux stratégies de dévasement

Années	lâchers (million m <sup>3</sup> )	taux de satisfaction (%)	lâchers (million m <sup>3</sup> )	taux de satisfaction (%)	lâchers (million m <sup>3</sup> )	taux de satisfaction (%)
Operation de dragage	Historique		Optimisés		Optimisés sans dragage (sans stratégie)	
2005	3,24	11%	14,00	47%	10,00	33%
2006	5,75	19%	12,75	43%	10,25	34%
2007	7,68	26%	13,50	45%	11,50	38%
2008	2,70	9%	12,00	40%	10,25	34%
Moyenne	4,84	16%	13,06	44%	10,50	35%
Amelioration				28%		19%
Operation de soutirage	Historique		Optimisés		Optimisés sans soutirage (sans stratégie)	
2009	17,96	60%	16,75	56%	18,50	62%
2010	13,54	45%	10,50	35%	13,00	43%
2011	15,94	53%	18,75	63%	26,50	88%
2012	8,11	27%	6,75	23%	10,50	35%
2013	3,65	12%	4,50	15%	12,75	43%
Moyenne	11,84	39%	11,45	38%	16,25	54%
Amelioration				-		15%

Les résultats présentés au tableau V.2, montrent que les lâchers optimisés pour le cas des soutirages des courants de densité sont supérieurs à ceux pour le cas de l'opération de dragage. Cependant, il est difficile de se prononcer sur l'efficacité des deux stratégies l'une par rapport à l'autre ; étant donné que les différentes périodes ont été soumises à des conditions différentes des précipitations et des apports.

La valeur la plus élevée des lâchers optimaux correspondant à 14 millions de m<sup>3</sup> a été enregistrée durant l'année 2005 (début de l'opération de dragage), alors que les gestionnaires du barrage de Foug El-Gherza ont offert un volume de 3,24 millions de m<sup>3</sup>. En raison de l'augmentation progressive de la vase au fond du réservoir, les écarts entre les lâchers optimaux pour les deux cas (dragage et sans dragage) ont diminué régulièrement de 4 millions de m<sup>3</sup> à 1,75 million de m<sup>3</sup>. On peut noter que la quantité totale d'eau économisée pendant cette période de 4 ans, est d'environ 10,25 millions de m<sup>3</sup>. Elle aurait permis d'offrir aux agriculteurs plus de 9% des lâchers pour irriguer leurs dattiers.

Le tableau V.2, montre que les taux de satisfaction obtenus durant les années de l'opération de dragage sont supérieurs à ceux obtenus dans le cas de sans dragage, qui sont également supérieurs aux taux de satisfaction offerts par les gestionnaires du barrage de Foug El-Gherza. La valeur la plus élevée correspondant à 47% a été enregistrée en 2005, alors qu'elle est estimée à 33% et 11% pour le cas de sans dragage et celle de l'historique respectivement. En moyenne, le dragage a permis d'augmenter le taux de satisfaction de 16 % (lâchers historiques) à 44 % (lâchers optimisés), tandis qu'un taux de satisfaction de 35 % (lâchers optimisés) a été obtenu dans le cas du non dragage.

Pour la stratégie de soutirages des courants de densité, une valeur moyenne correspondant à 39 % (lâchers historiques) a été enregistrée, qui est proche de celle optimisés (38 %). Alors que pour le cas de non soutirages le taux de satisfaction est à 54%. Ce qui indique que durant cette période de 5 ans, environ un volume de 24 millions de m<sup>3</sup> d'eau était évacué.

### V. 1.3. Courbes de gestion optimales

La figure V.3 représente les courbes de gestion optimales dérivées par DPNN pour les différentes stratégies de la gestion des sédiments réalisées dans le barrage de Foug El-Gherza.

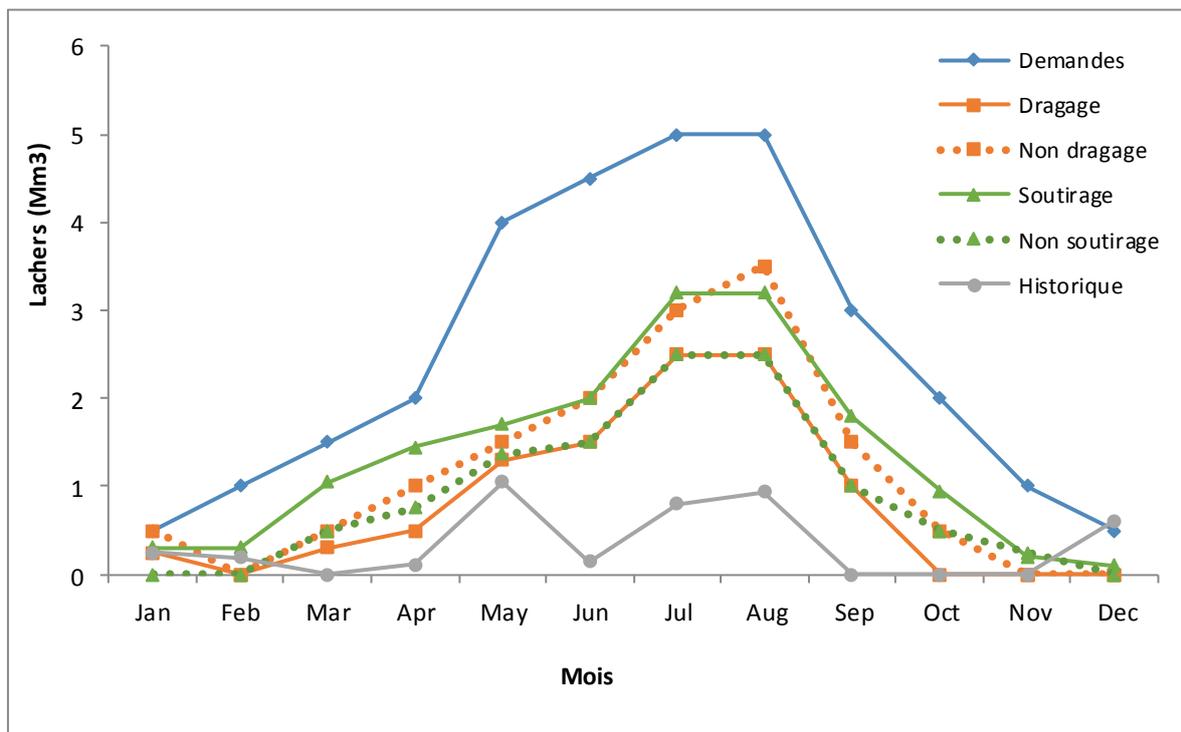


Figure V.3 Courbes des gestions optimales dérivées par DPNN

D'après la figure V.3, on peut constater que les lâchers d'eau mensuels optimisés pour les deux stratégies de la gestion des sédiments sont bien supérieurs aux lâchers offerts par les gestionnaires du barrage de Foug El-Gherza, mais ils n'ont pu satisfaire la demande des agriculteurs. L'écart le plus important a été enregistré pendant la période de mai à septembre, c'est-à-dire pendant la saison sèche d'été.

Montrant bien que le soutirage a permis de donner plus de lâchers mensuels optimaux par rapport à ceux du dragage. Cette dernière aurait été plus efficace si sa durée était prolongée jusqu'à l'année 2013.

## V. 2. ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'OPTIMISATION

Les diverses techniques d'optimisation qui ont été utilisées dans le domaine de la gestion des barrages sont basées souvent sur la maximisation ou la minimisation d'un critère objectif, afin d'obtenir une meilleure règle d'exploitation du système, et pour quelle sera opérationnelle et réalisable dans la pratique. L'estimation de la valeur de la fonction objective ne contient aucune information à propos de la fréquence de défaillance du système pour la fourniture en eau, ni de la durée et la sévérité des défaillances potentielles.

Dans ce contexte, des efforts importants ont été consentis dans la considération explicite de la robustesse dans l'optimisation.

L'introduction des indicateurs de performance sert à juger la qualité de la règle de gestion obtenue lors de la procédure de l'optimisation. Ainsi, elle permet de donner au gestionnaire des informations additionnelles et démonstratives sur l'exploitation des barrages.

Un certain nombre d'indices a été introduit au cours des dernières décennies pour évaluer la performance des systèmes de ressources en eau (Hashimoto et al (1982), Moy et al (1986), Vogel et Bolognese (1995)). Ces indices se basent sur une analyse statistique des caractéristiques des défaillances du système ou des épisodes défaillants. Le choix de ces indices de performance dépend énormément du problème étudié.

Hashimoto et al (1982) ont utilisé trois indicateurs de performance additionnels pour comparer un nombre de règles d'exploitation d'un barrage destiné pour l'irrigation. Ils ont introduit la : Robustesse pour décrire combien de fois le système n'a pas pu atteindre l'objectif prévu, Élasticité pour montrer la vitesse avec laquelle le système tend à revenir à son état d'équilibre une fois que la défaillance a eu lieu, et Vulnérabilité pour estimer combien les conséquences probables des défaillances produites peuvent être significatives. Ils ont conclu que tous les cas d'une grande robustesse du système ont été accompagnés par une vulnérabilité élevée.

Nandalal et Bogardi (1996) ont adopté sept indicateurs de performance pour analyser les impacts des différentes mesures de la salinité des lâchers du barrage. Les stratégies d'exploitation du réservoir ont été dérivées par optimisation et en considérant la qualité et la quantité des lâchers.

Mathlouti et Lebdi (2008) a rapporté qu'il y'a une façon de considérer les aspects liés à la performance d'un réservoir est de combiner les décisions issues de l'optimisation avec les décisions issues d'une évaluation basée sur la simulation subséquente du fonctionnement du réservoir. L'optimisation est exécutée en adoptant un critère objectif donné. La simulation est utilisée pour fournir une base pour l'évaluation de l'ensemble des critères de fiabilité. Cette approche permet à l'analyste de filtrer la gestion du réservoir sur un certain nombre de critères appropriés appelés indicateurs de performance (IP). Le choix des IP appropriés pour un problème à analyser est très dépendant du problème lui-même.

### V. 2.1. Événements rencontrés lors de l'exploitation des barrages

Pabiot (1999) a rapporté que trois évènements dommageables peuvent être rencontrés dans l'exploitation des barrages :

- 1- La défaillance du stock : Quand l'eau atteint un niveau inférieur, c.-à-d. la tranche morte de la retenue.
- 2- La déverse : C'est le cas où l'eau se trouve au niveau du déversoir
- 3- La non satisfaction de la demande : Les lâchers d'eau n'arrive pas à satisfaire les demandes.

Nous remarquons que les deux premiers incidents sont décrits par des comparaisons à des niveaux de consignes (niveau mort et déversoir), tandis que le dernier est une comparaison à la demande réelle affichée.

Il a même ajouté que ces incidents peuvent être décrits, par analogie à la description des précipitations, suivant trois indices de performance caractérisant l'intensité, la durée et la fréquence du phénomène.

- 1- Le risque (fréquence): correspond à la probabilité d'avoir une défaillance, une déverse ou une demande non satisfaite. Un état de dérangement du système se produit quand le stockage ou les lâchers sont en dehors de la gamme considérée acceptable ;
- 2- La vulnérabilité (intensité): correspond au volume perdu ou manquant à l'origine de l'incident. Elle mesure l'ampleur du risque soit : la répercussion moyenne d'un incident sur la ressource pour les usagers, la durée de séjour dans un état de défaillance ou le temps moyen entre deux défaillances successives ;
- 3- La résilience (durée): temps entre l'entrée du système dans un état dommageable et son retour à un état satisfaisant. Il correspond au temps moyen au bout duquel le système retourne à un état satisfaisant lorsque s'est produit un incident.

L'objectif de ces indices est de décrire totalement les phénomènes en termes d'intensité, durée et fréquence. Chaque gestionnaire choisit ses indices qui conviennent le mieux aux caractéristiques de son système et à ses priorités.

**V. 2.2. Fiabilité de la gestion des barrages**

Majid Mathlouthi et Fethi Lebdi (2008), ont désigné l'indice de fiabilité, qui correspond à la probabilité qu'un réservoir soit dans un état jugé satisfaisant. Un état satisfaisant est défini, par exemple, quand les niveaux des réservoirs se situent entre les niveaux minimal et maximal d'exploitation. Un état est insatisfaisant quand les niveaux se situent en dehors de ces limites. Cette mesure est l'opposée du critère de risque de défaillance, également rencontré dans la littérature. Il se définit simplement comme la fréquence d'états non satisfaisants, ou défaillants

$$Risk = 100\% - Fia \quad (V.1)$$

Il existe plusieurs variantes de la fiabilité utilisées en gestion des ressources en eau : la fiabilité basée sur le temps (mensuelle, annuelle), la fiabilité basée sur la quantité (volumes) et la fiabilité basée sur l'occurrence.

**V. 2.2.1. Fiabilité basée sur l'occurrence : Fia (1)**

La fiabilité basée sur l'occurrence peut être alors calculée comme :

$$Fia(1) = 1 / I + J \quad (V.2)$$

Où :

I : est le nombre des périodes non déficitaires consécutives

J : est le nombre des périodes déficitaires consécutives

Le nombre total de périodes est égal à (I+ J).

**V. 2.2. 2. Fiabilité basée sur le temps : Fia (2)**

$$Fia(2) = \frac{T - \sum_{t=1}^T f_t}{T} \quad (V.3)$$

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

T : est le nombre d'étapes (événements) considéré.

**V. 2.2.3. Fiabilité basée sur la quantité : Fia(3)**

$$Fia(3) = F / B \quad (V.4)$$

Où :

F : est la quantité réelle de fourniture produite pendant la période considérée

B : est le niveau de la demande ciblée pendant la période considérée égale à T étapes.

En ANNEXE E, un exemple de calcul des indices de performance pour un problème de la gestion des barrages est donné.

**V. 2.3. Evaluation des indices de performance de la gestion du barrage de Foum El-Gherza**

Pour évaluer la performance de l'optimisation du barrage de Foum El Ghorza, réalisée dans le chapitre précédant, nous allons calculer les trois critères les plus répandus RRV (*Reliability, Resilience and Vulnerability*), qui sont données par :

- 1- **Reliabilité périodique** : (ou la fiabilité basée sur l'occurrence Fia (1))
- 2- **Résilience** : qui exprime le rapport du nombre de période avec satisfaction après une défaillance ( $N_s$ ) sur le nombre de période avec défaillance ( $N_T$ ).

$$Res = N_s / N_T \quad (V.5)$$

- 3- **Vulnérabilité** : deux types de vulnérabilité sont définies :
  - a- Par Hashimoto et al (1982) :

$$vul_H = \frac{1}{M} \max \sum_{i=1}^M v_i \quad (V.6)$$

Où :

$v_i$  : Le plus grand écart entre la demande et la fourniture durant le  $i^{\text{ème}}$  épisode défaillant

M : le nombre d'épisodes défaillants

- b- Par Moy (1986) :

$$vul_M = \max(v_i) \quad (V.7)$$

Les valeurs des indices de performance pour les différentes stratégies de la gestion des sédiments sont récapitulées dans le tableau V.3

Tableau V.3 : Indices de performance

Indices de performance	Historique	Dragage	Soutirage
Reliabilité (%)	24	65	48
Résilience	0.10	0.41	0.22
Vulnérabilité (Mm <sup>3</sup> )	8.51	2.62	4.43

D'après le tableau VI.3, on peut remarquer la valeur la plus élevée pour la fiabilité est de 65 % qui correspond à la stratégie de dragage, alors qu'elle est de 48 % pour l'opération du soutirage. Sachant que les gestionnaires du barrage de Foug El-Gherza ont offert une fiabilité de 24%, la stratégie de dragage semble la plus efficace en vue de la satisfaction de la demande en eau par rapport aux autres stratégies.

D'autre part, la valeur la plus élevée pour la résilience est de 0,41 correspond à la stratégie de dragage, tandis qu'elle est de 0,22 pour l'opération du soutirage. Vu que les gestionnaires du barrage de Foug El-Gherza ont arrivé à une résilience de 0.10, cela montre que l'opération de dragage répond plus fréquemment aux demandes par rapport aux autres stratégies. Enfin, la plus faible valeur de la vulnérabilité est de 2,62 Mm<sup>3</sup> correspond à la stratégie de dragage, alors qu'elle est de 4,43 Mm<sup>3</sup> pour l'opération du soutirage. Avec une vulnérabilité dans la gestion historique de 8.51 Mm<sup>3</sup>, la stratégie de dragage reflète que la faible intensité des défaillances se retrouve, pour l'exploitation du réservoir, basée sur l'opération de dragage par rapport aux autres stratégies.

**Conclusion**

Dans ce chapitre, les stratégies de dévasement réalisées dans le barrage de de Foum El Gherza ont été tenues en compte. D'après la procédure de l'optimisation on a pu tirer les conclusions suivantes :

- les lâchers d'eau mensuels pour les deux stratégies sont bien supérieurs aux lâchers offerts par les gestionnaires du barrage, mais ils n'ont pu satisfaire la demande des agriculteurs.
- L'écart le plus important entre les lâchers optimaux et la demande en eau a été enregistré pendant la saison sèche d'été.
- Bien que les opérations de soutirage aient permis de préserver plus de volume d'eau dans la réserve du barrage, le dragage a permis d'augmenter le taux de satisfaction de 16 % (lâchers historiques) à 44 % (lâchers optimisés), tandis qu'un taux de satisfaction de 35 % (lâchers optimisés) a été obtenu dans le cas du non-dragage.
- Enfin, l'efficacité des stratégies de l'évacuation des sédiments a été examinée par l'évaluation des indices de performance. En examinant la fiabilité, la résilience et la vulnérabilité, les résultats ont abouti que l'opération de dragage a donné une exploitation plus fiable, résiliente et moins vulnérable par rapport aux autres stratégies.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Les barrages-réservoirs constituent la plus importante composante des systèmes de ressources en eau. La gestion de ces ouvrages hydraulique résulte en une séquence de décisions portant sur la répartition dans le temps et entre les différents usagers, des volumes d'eau disponibles. Les stratégies de gestion des barrages sont généralement guidées par des règles de gestion. Ces dernières sont établies au fil des années, et sont adaptées à : la nature, la diversité des objectifs et les usages à satisfaire.

L'enjeu hydraulique auquel est confrontée l'Algérie, avec des ressources en eau relativement limitées d'une part et en autre part, de la croissance des besoins en eau, exige de mettre en place des stratégies de gestion efficaces afin de préserver cette ressource vitale.

L'objectif principal de cette étude était de contribuer à l'amélioration de la gestion des barrages-réservoirs en Algérie. Un souci qui pousse les responsables du secteur de l'eau de veiller sur la bonne gestion de cette ressource, depuis que le pays a souffert d'un manque énorme et même d'une pénurie dans les régions du sud.

Au premier lieu, quatre barrages ont été choisis, dans les différentes régions du pays, qui sont : Boukourdane (W.Tipaza), Cheffia (W.Taref), Cheurfas II (W.Mascara) et Foum El-Gherza (W.Biskra). L'optimisation de la gestion de ces barrages a été réalisée par la technique de programmation dynamique combinée aux réseaux de neurones (DPNN), afin de dériver les règles d'exploitation optimales, tout en assurant la satisfaction de la demande agricole d'une part, et en gardant le niveau d'eau dans le barrage proche d'un niveau objectif.

### 1. Synthèse des résultats

Les résultats de l'optimisation obtenus sont très satisfaisants, puisqu'on a pu améliorer le taux de satisfaction de la demande de 47, 49 et 49% jusqu'à 90, 60 et 70% pour les barrages de Cheffia, Boukourdane et Cheurfas II respectivement. Cela était possible à réaliser si les gestionnaires auraient conservé les apports dans les périodes de crues, pour les exploiter dans les périodes où il y aura un manque d'eau.

À partir des courbes de règle de gestion optimales obtenues par la procédure de l'optimisation, on a pu remarquer que les lâchers optimaux mensuels, pour l'ensemble des barrages, sont supérieurs à ceux fournis par les gestionnaires (historiques). Aussi, on a pu enregistrer que les lâchers optimaux n'ont jamais atteint les demandes.

Pour le barrage de Foug El Gherza, la procédure d'optimisation montre que le taux de satisfaction est augmenté à l'ordre de 47%. Ce résultat qui apparaît décevant a été influencé d'une part, par des périodes successives de sécheresses qui a connu la région, et d'autre part, du problème de l'envasement.

Le suivi de l'état d'envasement du barrage de Foug El Gherza a permis de constater qu'une quantité de 40 millions de m<sup>3</sup> de vase s'est déposée dans la retenue, depuis sa mise en exploitation en 1950. Soit un taux de comblement de 85% de la capacité initiale.

Dans le but de minimiser les quantités de vase déposées au réservoir du barrage de Foug El Gherza, des solutions préventives ont été projetées au niveau du bassin versant. Malgré ces interventions le problème persiste, ce qui a obligé les responsables à adopter d'autres modes de dévasement, qui sont : le soutirage des courants de densité et le dévasement par dragage.

Les résultats de l'optimisation, en tenant compte l'influence de ces deux stratégies de dévasement, ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- les lâchers d'eau mensuels pour les deux stratégies sont bien supérieurs aux lâchers offerts par les gestionnaires du barrage, mais ils n'ont pu satisfaire la demande des agriculteurs.
- L'écart le plus important entre les lâchers optimaux et la demande en eau a été enregistré pendant la saison sèche d'été.
- Bien que les opérations de soutirage aient permis de préserver plus de volume d'eau dans la réserve du barrage, le dragage a permis d'augmenter le taux de satisfaction de 16 % (lâchers historiques) à 44 % (lâchers optimisés), tandis qu'un taux de satisfaction de 35 % (lâchers optimisés) a été obtenu dans le cas du non-dragage.
- Enfin, l'efficacité des stratégies de l'évacuation des sédiments a été examinée par l'évaluation des indices de performance. En examinant la fiabilité, la résilience et la vulnérabilité, les résultats ont abouti que l'opération de dragage a donné une exploitation plus fiable, résiliente et moins vulnérable par rapport aux autres stratégies.

## **2. Perspectives et Recommandations**

La présente étude est d'une grande importance sur la pratique, car elle permet d'avoir un outil d'aide à la décision applicable pour les gestionnaires du barrage de Foug El Gherza, par la projection d'une stratégie de dévasement efficace. Nous suggérons qu'elle soit appliquée pour d'autres barrages algériens, qui ont un degré d'envasement avancé.

Ainsi, sur la base des résultats du présent travail, et particulièrement en ce qui concerne l'influence des stratégies de la gestion des sédiments sur l'exploitation du barrage de Foug El-Gherza, le taux de satisfaction de la demande n'a pas atteint la moitié (47%). Pour cela, il

semble être approprié de diriger des recherches supplémentaires en traitant d'autres stratégies de lutte contre l'envasement, tel que la surélévation des barrages. Cette solution a été projetée sur quelques barrages du pays (Beni Amrane en 2001, Zardezas en 1977 et K'sob1975). Elle a permis de récupérer un volume d'eau de 170 millions m<sup>3</sup>. En perspective, une étude de l'influence de la stratégie de la surélévation du barrage sera l'objet d'une étude qui sera envisagée dans les prochains travaux de recherches.

Les approches développées et appliquées dans le cadre de ce travail ont été testées sur le cas des barrages avec un seul réservoir. Il est de grand intérêt de rechercher la possibilité de traiter le cas des réservoirs en série (avec cascade). Et du fait que le problème devient de grande taille et plus complexe, l'application de la PDDNN semble limitée et peut ne pas aboutir à des résultats fiables. De cela, le recours à des méthodes heuristique sera nécessaire pour surmonter la complexité du problème.

## Références bibliographiques

- 1- Ahmed J & Sarma A (2005) Genetic algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir. *Water Resour Manag* 19:145–161.  
doi:10.1007/s11269-005-2704-7
- 2- Annandale W, Morris G & Karki P (2014) Extending the life of reservoirs: sustainable sediment management for dams and run-of-river hydropower. The World Bank, Washington, DC.
- 3- Bellman R (1957). *Dynamic programming*, Princeton university press Princeton. New Jersey Google Scholar.
- 4- Bellostas A (1981) Modèles de recherche opérationnelle appliqués à la planification et à la gestion des ressources en eau : le modèle LOIRE du laboratoire d'hydrologie mathématique à Montpellier, Thèse USLT, Montpellier.
- 5- Benfetta H, Ouadja A, Hocini N (2017) Enhancement of the study of water leaks in the Algerian dam of Fom El Gherza. *Arab J Geosci* 10:482
- 6- Bohanec M (2001) “What is Decision Support?” *Proc. Information Society : Data Mining and Decision Support in Action*, pp : 86-89, 2001.
- 7- Bossard J (1989) *La programmation linéaire dans les modèles de production*. Actualités Scientifiques et Agronomiques de l'INRA, No. 14, 1989, Masson, Paris.
- 8- Cai X, McKinney D & Lasdon L (2001), Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach, *Adv. Water Resour*, 24(6), 667– 676, doi:10.1016/S0309-1708(00)00069-5.
- 9- Cancelliere A, Giuliano G, Ancarani A & Rossi G (2002) A neural networks approach for deriving irrigation reservoir operating rules, *Water Resour. Manage.* 16(1), 71-88.
- 10- Celeste AB & Billib M (2009) Evaluation of stochastic reservoir operation optimization models. *Adv Water Resour* 32:1429–1443.  
doi:10.1016/j.advwatres.2009.06.008
- 11- Celeste A, Suzuki K & Kadota A (2004) Genetic algorithms for real-time operation of multipurpose water resource systems, *Journal of Hydroinformatics* 6 (1): 19–38.
- 12- Chandramouli V & Deka P (2005) Neural Network Based Decision Support Model for Optimal Reservoir Operation, *Water Resources Management* volume 19, pages 447–464
- 13- Chang FJ & Chang YT (2006) Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. *Adv Water Resour* 29(1):1–10.

- 14- Chang FJ, Chen L & Chang L (2005). Optimization the reservoir operating rule curves by genetic algorithm. *Hydrological Processes*, 19(11), 2277–2289.
- 15- Chang (2006) Applying nonlinear generalized autoregressive conditional heteroscedasticity to compensate ANFIS outputs tuned by adaptive support vector regression. *Fuzzy Sets and Systems* 157 (13), Pages 1832-1850.
- 16- Chang FJ, Lai JS & Kao LS (2003) Optimization of operation rule curves and flushing schedule in a reservoir. *Hydrol Process* 17(8):1623–1640.
- 17- Chang LC & Yang CC (2002) Optimizing the rule curves for multi-reservoir operations using a genetic algorithm and HEC-5. *J Hydrosoci Hydraul Eng* 20(1):59–75
- 18- Chau K (2004) River stage forecasting with particle swarm optimization" *Proceedings of the 17th international conference on Innovations in applied artificial intelligence*, Ottawa, Canada, pp. 1166-1173.
- 19- Chau W (2007) A split-step particle swarm optimization algorithm in river stage forecasting. *Journal of Hydrology*, 346 (3–4), 131–135.
- 20- Chen (2003) Real Coded Genetic Algorithm Optimization of Long Term Reservoir Operation, *Journal of the American Water Resources Association*, 39 (5). PP 1157-1165.
- 21- Dandy G & Crawley P (1992) Optimum operation of a multiple reservoir system including salinity effects, *Water Resources Research*, 28 (4), PP 979-990
- 22- Dechemi N, Benkaci A & Issolah A (2003) Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. *Revue des Sciences de l'eau* 18(3); 407-424.
- 23- Doffman R (1962) Mathematical models' The multi-structure approach, in *Design of Water Resources Systems*, edited by A. Maass, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1962.
- 24- Eberhart R & Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory, in: *MHS'95 Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1995, pp. 39–43.
- 25- Ehsani N, Fekete B, Vorosmarty C & Tessler Z (2016) A neural network based general reservoir operation scheme. *Stoch Environ Res Risk Assess* 30:1151–1166.
- 26- Elferchichi A, Gharsallah O, Nouiri I et al (2009) The genetic algorithm approach for identifying the optimal operation of a multi-reservoirs on-demand irrigation system. *Biosyst Eng* 102:334–344. doi:10.1016/j. biosystemseng.2008.12.009.

- 27- Fayaed SS, El-Shafie A, Jaafar O (2013) Reservoir-system simulation and optimization techniques. *Stochastic environmental research and risk assessment* 27(7): 1751-1772.
- 28- François B (2013) Gestion optimale d'un réservoir hydraulique multiusages et changement climatique. Modèles, projections et incertitudes Application à la réserve de Serre-Ponçon. Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble.
- 29- Gautam DK & Holz KP (2001) Rainfall-runoff modelling using adaptive neuro-fuzzy systems. *J Hydroinform* 3:3–10.
- 30- Gill K, Kaheil H, Khalil A, McKee M & Bastidas L (2006). Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology. *Water Resources Research*, 42. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004528>.
- 31- Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley, Publishing Co., Inc., Reading.
- 32- Hajiabadi R & Zarghami M (2014) Multi-objective reservoir operation with sediment flushing; case study of Sefidrud reservoir. *Water Resour Manag* 28(15):5357–5376.
- 33- Hasebe M & Nagayama Y (2002) Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and support. *Adv Eng Soft* 33:245–260.
- 34- Hashimoto T, Stedinger R & Loucks P(1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance. *Water Resour. Res.* 18(1), 14–20.
- 35- Hiew K, Labadie J & Scott J (1989) “Optimal operational analysis of the Colorado-Big Thompson project.” *Computerized decision support systems for water managers*, J. Labadie et al., eds., ASCE, Reston, Va., 632–646.
- 36- Holland J (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MIT.
- 37- Jang JSR. (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst, Man, Cybernet* 1993;23(3):665–85.
- 38- Karaboga D, Bagis A & Haktanir T (2004) Fuzzy logic based operation of spillway gates of reservoirs during floods. *J. Hydrol. Engng* 9 (6), 544–549.
- 39- Kangrang A & Chaleeraktragoon C (2007) Genetic algorithms connected simulation with smoothing function for searching rule curves. *Am. J. Applied Sci.*, 4: 73-79.
- 40- Kangrang, A, Compliew S & Chaiyapoom W (2009) Heuristic Algorithm with Simulation Model for Searching Optimal Reservoir Rule Curves, *American Journal of Applied Sciences*, 6 (2): 263-267.

- 41- Kantoush S & Sumi T (2013) Reservoir sedimentation and sediment management techniques in the Nile River basin countries. Paper presented at the 12th International Symposium on River Sedimentation, Kyoto.
- 42- Karamouz M & Houck H (1982) Annual and monthly reservoir operating rules generated by deterministic optimization. *Water Resour Res* 18(5):1337–1344.
- 43- Karamouz, M, Houck M & Delleur J (1992) “Optimization and simulation of multiple reservoir systems.” *J. Water Resour. Plan.Manage*, 118 (1), 71–81.
- 44- Karamouz M & Houck MH (1987) Comparison of stochastic and deterministic dynamic programming for reservoir operating rule generation. *Water Resour Bull* 23(1):1–9
- 45- Kerachian R & Karamouz M (2005). Waste-load allocation model for seasonal river water quality management: application of sequential dynamic genetic algorithms. *Scientia Iranica*, 12(2), 117–130.
- 46- Khan M & Tingsanchali T (2009) Optimization and simulation of reservoir operation with sediment evacuation: a case study of the Tarbela Dam, Pakistan. *Hydrol Process Int J* 23(5):730–747.
- 47- Kumar N & Reddy J (2007) Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(3), 192-201. [doi:10.1061/(ASCE) 0733-9496(2007)133:3(192)]
- 48- Kuo, F, Merkley P & Liu W (2000) Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm, *Agri. Water Manage.* 45, 243–266, 2000.
- 49- Labadie JW (2004) Optimal operation of Multireservoir systems: State-of-the-art review. *J Water Resour Plan Manag* 130:93–111.
- 50- Loucks DP & Beek Ev (2005) *Water Resources Systems Planning and Management An Introduction to Methods, Models and Applications*. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO PUBLISHING,
- 51- Mathlouthi M & Lebdi F (2008) Evaluation de la fiabilité de gestion d'un barrage réservoir pour des événements secs / Assessment of the reliability of reservoir dam operation for dry events *Hydrological Sciences Journal* 53:1194-1207 doi:10.1623/hysj.53.6.1194.
- 52- Mathur Y & Nikam S (2009) Optimal reservoir operation policies using genetic algorithm. *Int. J. Eng Technol*(2), 184-187. <https://doi.org/10.7763/IJET.2009.V1.34>.
- 53- Mediero L, Garrote L & Martin-Carrasco F (2007) A probabilistic model to support reservoir operation decisions during flash floods, *Hydrological Sciences*

- Journal, 52:3, 523-537, DOI: 10.1623/hysj.52.3.523.
- 54- Mehta R, Jain SK & Kumar V (2005) Fuzzy technique for reservoir operation – effect of membership functions with different number of categories. *Hydrol J* 28(3):17–33
- 55- Mehta R & Jain S (2009) Optimal Operation of a Multi-Purpose Reservoir Using Neuro-Fuzzy Technique. *Water Resour Manage* (2009) 23:509–529.
- 56- Merabet et Souissi (2008) Irrigation of Date Palm and Associated Crops, Damascus, Syrian Arab Republic, FAO edition.
- 57- Meraji S, Hamed J, Afshar M & Afshar A (2006) Reservoir Operation by Particle Swarm Optimization Algorithm, 7th International conference of Civil Engineering (Icce7th), 2006, Tehran, Iran.
- 58- Minoux M (1983) *Programmation mathématique : théorie et algorithmes*. Collection Technique et Scientifique des Télécommunication, Dunod, Paris. (2 volumes).
- 59- Montalvo I, Izquierdo J, Perez, R & Tung M (2008) Particle Swarm Optimization applied to the design of water supply systems. *Computers and Mathematics with Applications*. 56 (09): PP 769–776.
- 60- Moody J & Darken C (1988) "Learning with localized receptive fields", Proc. 1988 Connectionist Models Summer School, 1988.
- 61- Moy S, Cohon L & ReVelle, 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.
- 62- Nagesh K, Raju K & Ashok B (2006) “Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using genetic algorithms,” *Journal for Irrigation And Drainage Engineering*, Vol.132, No.2, pp.123-129.
- 63- Nandalal W & Bogardi J (1996) Reliability analysis of a reservoir for salinity control. Proc. Int. Conf. on Water Resources and Environment Research: Towards the 21st Century (Kyoto, 1996), 263–269. Kyoto University, Japan.
- 64- Oliveira R & Louckas D (1997) Operating rules for multi-reservoir systems, *Water resources research J.*, vol. 33(4), pp.839-852.
- 65- Pabiot F (1999) *Optimisation De La Gestion D'un Barrage Collinaire En Zone Semi-Aride*. (D A A) Physiques des Surfaces Naturelles et Génie Hydrologique Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes
- 66- Parent E (1991) *Elaboration des consignes de gestion des barrages-réservoirs*. Thèse de Doctorat, ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES.

- 67- Pereira F & Pinto G (1985) stochastic optimization of a multi-reservoir hydroelectric system: A decomposition approach. *Water Resour. Res.* 21(6): 779–792.
- 68- Petkovsek G & Roca M (2014) Impact of reservoir operation on sediment deposition. Paper presented at the Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management.
- 69- Pinthong P, Das Gupta A, Babel MS & Weesakul S (2006) Daily streamflow forecasting using genetic algorithm based neurofuzzy approach. Paper presented at the 7th international conference on hydroinformatics (HIC2006): Innovate and Share. Acropolos, Nice.
- 70- Pinthong P, Gupta A, Babel M & Weesakul S (2009) Improved Reservoir Operation Using Hybrid Genetic Algorithm and Neurofuzzy Computing. *Water Resour Manage* 23:697–720. DOI 10.1007/s11269-008-9295-z
- 71- Rashid U, Shakir S, Khan M, Latif A & Qureshi M (2015) Optimization of multiple reservoirs operation with consideration to sediment evacuation. *Water Resour Manag* 29(7):2429–2450.
- 72- Raman H & Chandramouli V (1996) Deriving a general operating policy for reservoirs using neural network. *J Water Resour Plan Manag* 122, 5(342):342–347.
- 73- Remini B (2017). Une nouvelle approche de gestion de l'envasement des barrages. *Larhyss journal*, N°31, Sept, pp. 51-81.
- 74- Remini B (2019) L'ALGERIE : DE LA BOUE AU FOND DES BARRAGES, QUE FAIRE ? *Larhyss Journal*, n°40, pp. 213-247. ISSN 1112-3680.
- 75- Remini B & Hallouche W (2005) Prevision de l'envasement dans les barrages du Maghreb. *Larhyss Journal* 04:69-80.
- 76- Remini B & Maazouz M (2018). Les courants de densité dans le barrage de Foum El Gherza (Algérie). *Larhyss Journal*, N°35, Sep 2018, pp. 87-105.
- 77- ReVelle, C, Joeres E & Kirby W (1969) The linear decision rule in reservoir management and design, 1, Development of the stochastic model, *Water Resour. Res.*, 5(4), 767-777.
- 78- Roefs G & Bodin D (1970) Multi-reservoir operation studies', *Water Resour. Res.* 6(2): 410–420.
- 79- Ross TJ (1997) *Fuzzy logic with engineering applications*. Mc Graw Hill international editions, electrical engineering series. McGraw-Hill, New York
- 80- SaberChenari K, Abghari H & Tabari H (2016) Application of PSO algorithm in short-term optimization of reservoir operation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188 667
- 81- Safae L (2015) Approche pour la construction de modèle d'estimation réaliste de l'effort/cout de projet dans un environnement incertain : application au domaine du

- développement de logiciel Informatique. Thèse de Doctorat, Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, 2015.
- 82- Safayat A (2015) Optimal Operation of Single Reservoir Using Artificial Neural Network, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Volume 6, Issue 6, pp. 124-132, 2015
- 83- Schleiss AJ, Franca MJ, Juez C, De Cesare G (2016) Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research* 54(6): 595-614
- 84- Sedkin A & Ouazar D (2012) Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 26, Issue 3, Pages 582-591.
- 85- Sharif & Wardlaw (2000) Multireservoir system optimization using genetic algorithms- Case study, *J. computation in civil engineering* 14(4).pp-255-263.
- 86- Shirangi E, Kerachian A & Bajestan M (2008) A simplified model for reservoir operation considering the water quality issues: Application of the Young conflict resolution theory, *Environmental Monitoring and Assessment* volume 146, pages 77–89.
- 87- Shokri A, Haddad OB, & Mariño MA (2013) Reservoir operation for simultaneously meeting water demand and sediment flushing: Stochastic dynamic programming approach with two uncertainties. *J Water Resour Plan Manag* 139(3):277–289.
- 88- Spiliotis M (2014) A Particle Swarm Optimization (PSO) heuristic for water distribution system analysis. *Water Utility Journal*. 8: PP 47-56.
- 89- Sudheer K & Jain S (2003) Radial Basis Function Neural Network for Modeling Rating Curves, *Journal of Hydrologic Engineering* Volume 8 Issue 3.
- 90- Tebbi F, Dridi H & Morris G (2012) Optimization of cumulative trapped sediment curve for an arid zone reservoir: Fom El-Gherza (Biskra, Algeria). *Hydrol Sci J* 57(7):1368–1377.
- 91- Touaïbia B (2010) Effets des Aménagements Anti-Erosifs dans la Conservation de l'Eau. Communication : Création Réseau Erosion : GCES. Avril 2004. AUF. Paris).
- 92- Vedula S & Mujumdar P (1992) Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops, *Water Resour Res.* 28 (1). PP 1-9.
- 93- Vedula S & Kumar N (1996) An Integrated Model for Optimal Reservoir Operation for Irrigation of Multiple Crops. *Water Resour Res* 32 (4). PP 1101-1108.
- 94- Vernieuwe H, Georgieva O, Bernard D, Valentijn R, Niko E & Francois P (2005) Comparison of data-driven Takagi-Sugeno models of rainfall-discharge dynamics. *J Hydrol* 302 (1–4):173–186.

- 95- Vogel R & Bolognese R. (1995) Storage–reliability–resiliency–yield relations for over-year water supply systems. *Water Resour. Res.* 31(3), 645–654.
- 96- Wan I, Mahamud K & Morwawi N (2011) Conceptual Model of Intelligent Decision Support System Based on Naturalistic Decision Theory for Reservoir Operation during Emergency Situation. *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, Vol: 11 No: 02 6
- 97- Wang W, Xu D, Chau K & Chen S (2013) Improved annual rainfall-runoff forecasting using PSO–SVM model based on EEMD, *Journal of Hydroinformatics* 15 (4), 1377-1390.
- 98- Wurbs R (1993). “Reservoir-system simulation and optimization models.” *J. Water Resour. Plan. Manage*, 119 (4), 455–472.
- 99- Xiong L, Shamseldin A & O’Connor K (2001) A non-linear combination of the forecasts of rainfall-runoff models by the first-order Takagi-Sugeno fuzzy system. *J Hydrol* 245(14):196–217.
- 100- Yeh W (1985). Reservoir management and operations models : A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, 21(12):1797-1818.
- 101- Young GK (1967) Techniques for finding reservoir operating rules. Harvard University, Div Am. Soc. Civ. Eng., 93(HY6), 297-321, 1967.
- 102- Zack M (1985) The Role of Decision Support Systems in an Indeterminate World. *Decision Support Systems*, 43, pp: 1664-1674, 2007.

## ANNEXE A

## Algorithme d'essais particulières

**Algorithme 1 :** Algorithme standard de PSO

- 
1. Input : Problem dimension ( $>2$ )
  2. Fitness objective
  3. Output: S (g): Optimal solution
  4. Initialization:
  5. Generate the parameters:  $x_i, v_i, c_i (i = 1, 2, \dots, Ng), c_p (p = 1, 2, \dots, Np)$  and  $c_g$
  6. Evaluate:  $S(x_i), (i = 1, 2, \dots, Ng)$
  7. Initialize:  $p_i \leftarrow x_i$  and  $g \leftarrow \{p_k / S(p_k) \leftarrow \min S(p_i), i = 1, 2, \dots, Np\}$
  8. Initialize:  $T \leftarrow 0, Iter \leftarrow 0, T_{ref}, S_{ref}$  and  $Iter_{max}$
  9. *While* ( $Iter_{max} < Iter, T_{ref} < T_{process}$  and  $S_{ref} < S(g)$ )
  10. Generate random number  $c_i, c_p, c_g \in [0, 1]$
  11. For each particle i do:
  12.  $v_i \leftarrow c_i v_i + c_p (p_i - x_i) + c_g (g - x_i)$  with  $v_i \in \{v_{max}, v_{max}\}$
  13.  $x_i \leftarrow x_i + v_i$
  14. if  $S(x_i) < S(p_k)$  then  $p_i \leftarrow x_i$
  15. if  $S(p_i) < S(g)$  then  $g \leftarrow p_i$
  16. end for
  17. update  $Iter$  and  $T_{process}$
  18. *end while*
  19. Report g and S(g)
-

## ANNEXE B

## ANNEXE B. 1. Présentation du barrage de Boukourdane

## 1 Situation géographique

Le barrage de Boukourdane est un barrage en terre située à l'ouest d'Alger (Fig Ann. B.1) dans la wilaya de Tipaza. Il se trouve à 11Km du bord de la méditerranée. Ce barrage a été construit en 1992 pour une capacité initiale de 105 Hm<sup>3</sup>.



Figure Ann. B.1 Vue rive gauche du Barrage de Boukourdane (ANBT, 2017)

Les courbes caractéristiques du barrage sont données par les relations 1 et 2.

$$H = 75,65 + 1,93 * V - 0,05 * V^2 + 3 * 10^{-6} * V^4 \quad (\text{Ann B. 1})$$

$$S = 0,28 + 0,104 * V - 0,001 * V^2 + 5 * 10^{-6} * V^3 \quad (\text{Ann B. 2})$$

## 2. Caractéristiques du bassin versant du barrage de Boukourdane

Le barrage de Boukourdane est implanté à l'exutoire est construit sur le lit de l'oued El-Hachem au confluent des deux principaux oueds : Menacer Boukadir et Fedjana, il draine un bassin versant d'environ 156 Km<sup>2</sup> de surface (Fig Ann B. 2).

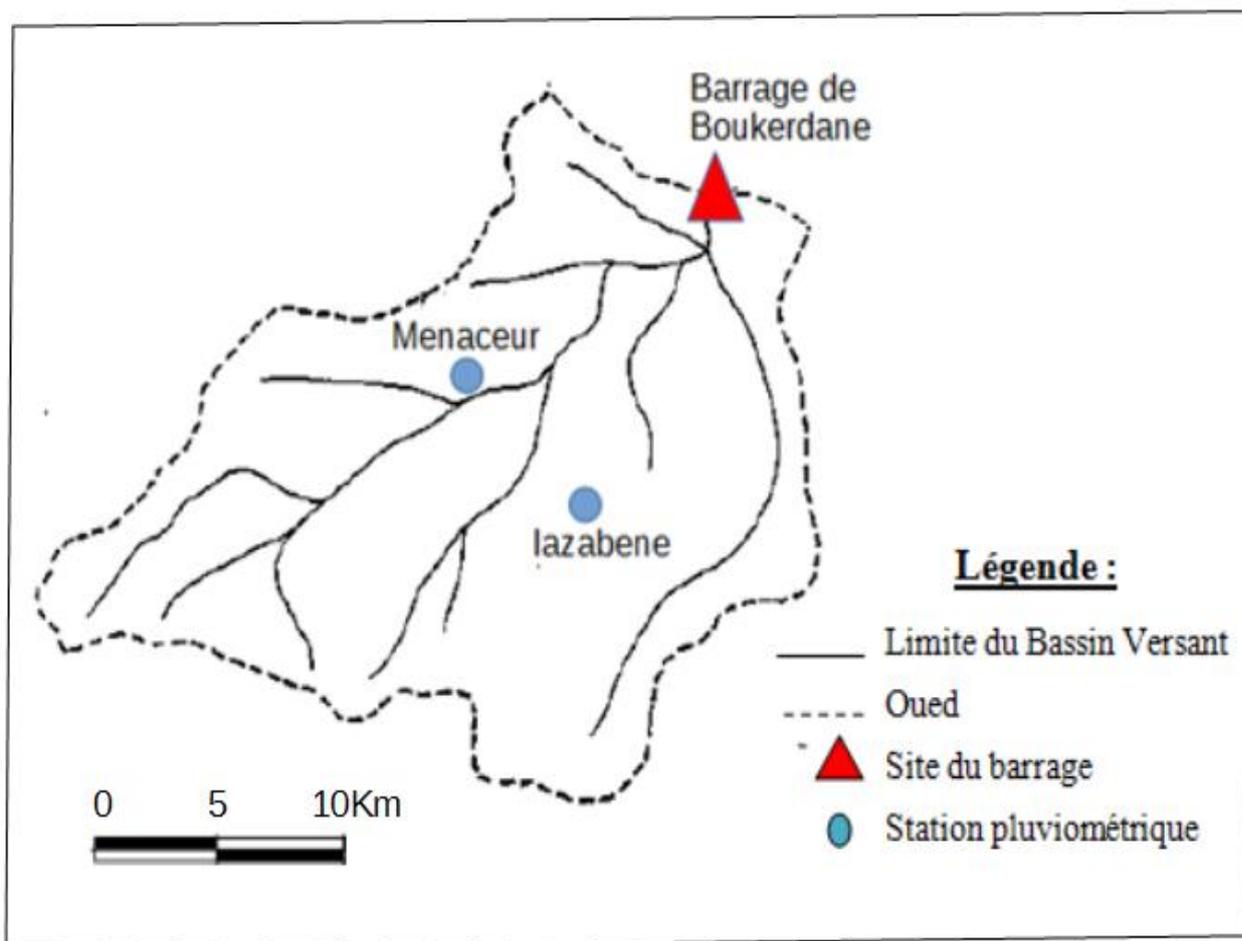


Figure Ann B. 2 : Bassin versant du barrage de Boukourdane, (ANBT, 2017)

Le bassin versant du barrage de Boukourdane compte deux stations pluviométriques : la station de Menaceur et Iazabane. Leurs caractéristiques sont récapitulées dans le tableau Ann B. 1.

Tableau A.II 1 : Stations pluviométriques au niveau du bassin versant

Station	Code	Coordonnées géographiques		Altitude (m)
		X (Km)	Y(Km)	
Menaceur	020303	458,25	354,45	250
Iazabane	020304	461,15	371,30	270

(ANRH, 2017)

### 3. Précipitations

Les précipitations moyennes mensuelles sur le site du barrage pour une période allant de 1968/69 à 2015/16, sont récapitulées dans le tableau A. II 2

Tableau A. II 2: Précipitations moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total annuel
Précipitation moyenne (mm)	75,88	72,73	69,66	53,23	37,68	7,78	2,27	4,88	27,45	54,87	81,10	84,47	572

(ANRH, 2017)

### 4. Température

Le barrage de Boukerdane est influencé par un climat Méditerranéen, avec des valeurs minimales pendant les mois de Décembre et Janvier, correspond jusqu'à 17 C°. Tandis que les valeurs maximales coïncident avec les mois de Juillet et Août, correspond jusqu'à 35 C°.

Tableau A. II 3 : Températures moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Température moyen (C°)	22,5	17,1	14,2	11,5	10,8	11,2	12,3	14,4	17,3	21,4	24,4	24,5

(ANRH, 2017)

## 5. Apports liquides

D'après la figure Annexe II 3, on peut remarquer deux périodes, la première qui s'étale de 1996/97 à 2003/04, où on dénombre moins d'années humides (2/8) que d'années sèches (6/8). Ces dernières ont des valeurs inférieures à celles de l'apport moyen annuel qui est de 21,61Mm<sup>3</sup>, où l'année 1996/97 enregistre le plus faible apport soit 7 Mm<sup>3</sup>.

Dans la deuxième période (de 2004/05 à 2015/16), on dénombre plus d'années humides (8/12) que d'années sèches (4/12).

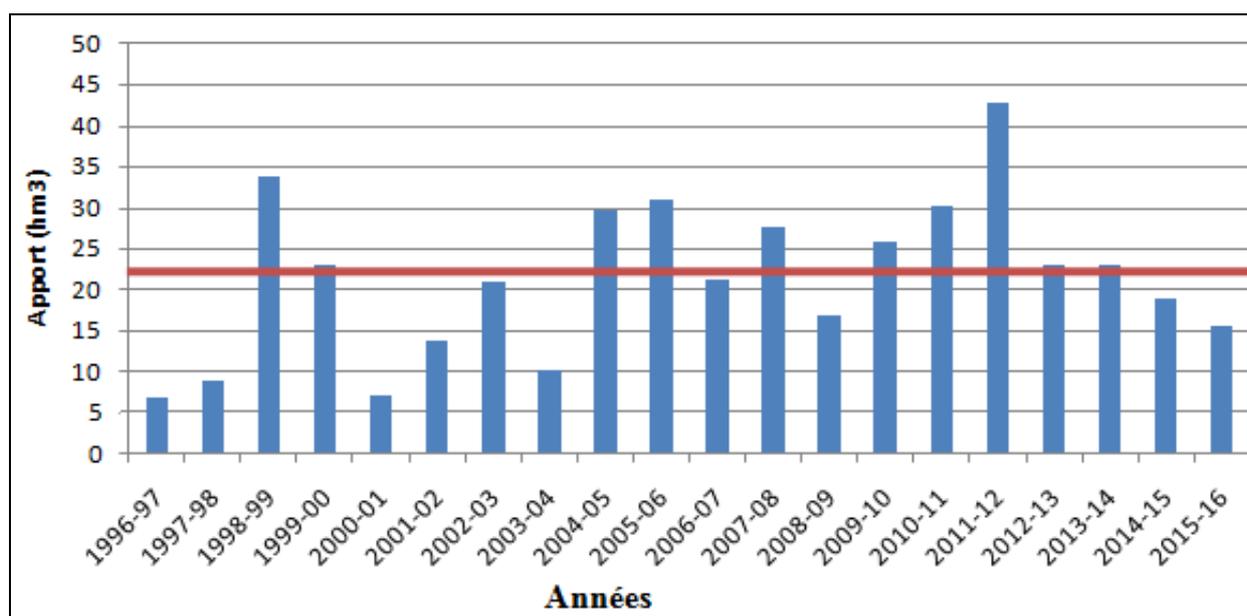


Figure A. II 3 : Apport moyen annuel

## 6. Evaporation

Le volume net moyen annuel perdu par évaporation est estimé à  $3,9 \text{ hm}^3$ , représentant 18% de l'apport moyen annuel.

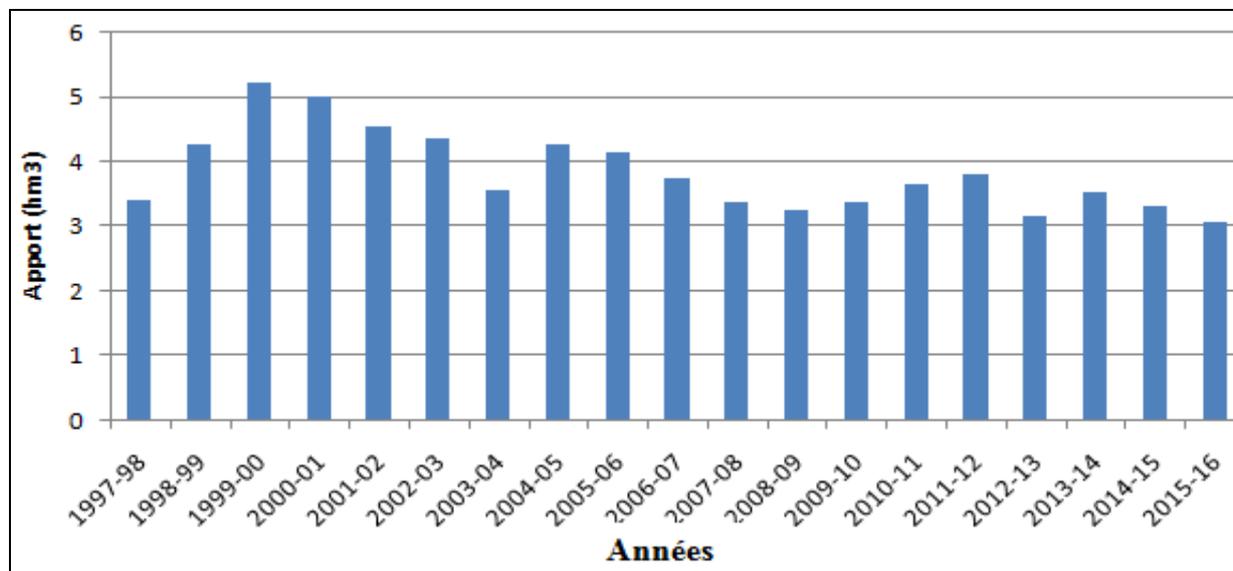


Figure A. II 4 : Évolution des volumes moyens annuels évaporés

## 7. Infiltrations

Depuis son entrée en exploitation, le barrage de Boukerdane a connu un problème des infiltrations où des résurgences sont apparues en aval, les volumes des infiltrations sont présentés dans le tableau A. II 4.

Tableau A. II.4 : Volumes moyens mensuels des fuites

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Volume des fuites (Hm <sup>3</sup> )	0,39	0,40	0,41	0,40	0,50	0,44	0,39	0,38	0,35	0,35	0,38	0,38

(ANBT, 2017)

Le volume moyen annuel perdu par les infiltrations est estimé à  $4.45 \text{ hm}^3$ , qui représente environ de 20,6% de l'apport moyen annuel.

## ANNEXE B. 2. Présentation du barrage de Cheffia

### 1. Situation géographique

Le barrage de Cheffia est un barrage en terre. Il est situé à 50Km au Sud Est de la ville d'Annaba. Ce barrage a été construit en 1965 pour une capacité initiale de 171 Hm<sup>3</sup> (Fig A. II.5).



Figure A. II.5 : Barrage de Cheffia (ANBT, 2017)

Les courbes caractéristiques du barrage sont données par les relations II.3 et II.4.

$$H = 137 + 0,305 * V - 0,001 * V^2 + 3 * 10^{-6} * V^3 \quad (\text{Ann B. 3})$$

$$S = 0,007 + 0,006 * V - 5 * 10^{-6} * V^2 \quad (\text{Ann B. 4})$$

## 2. Caractéristiques du bassin versant du barrage de Cheffia

Le barrage de la Cheffia est implanté à l'exutoire de l'Oued de Bou-Namoussa qui draine un bassin versant d'environ 2600 Km<sup>2</sup> (Fig A. II.6).

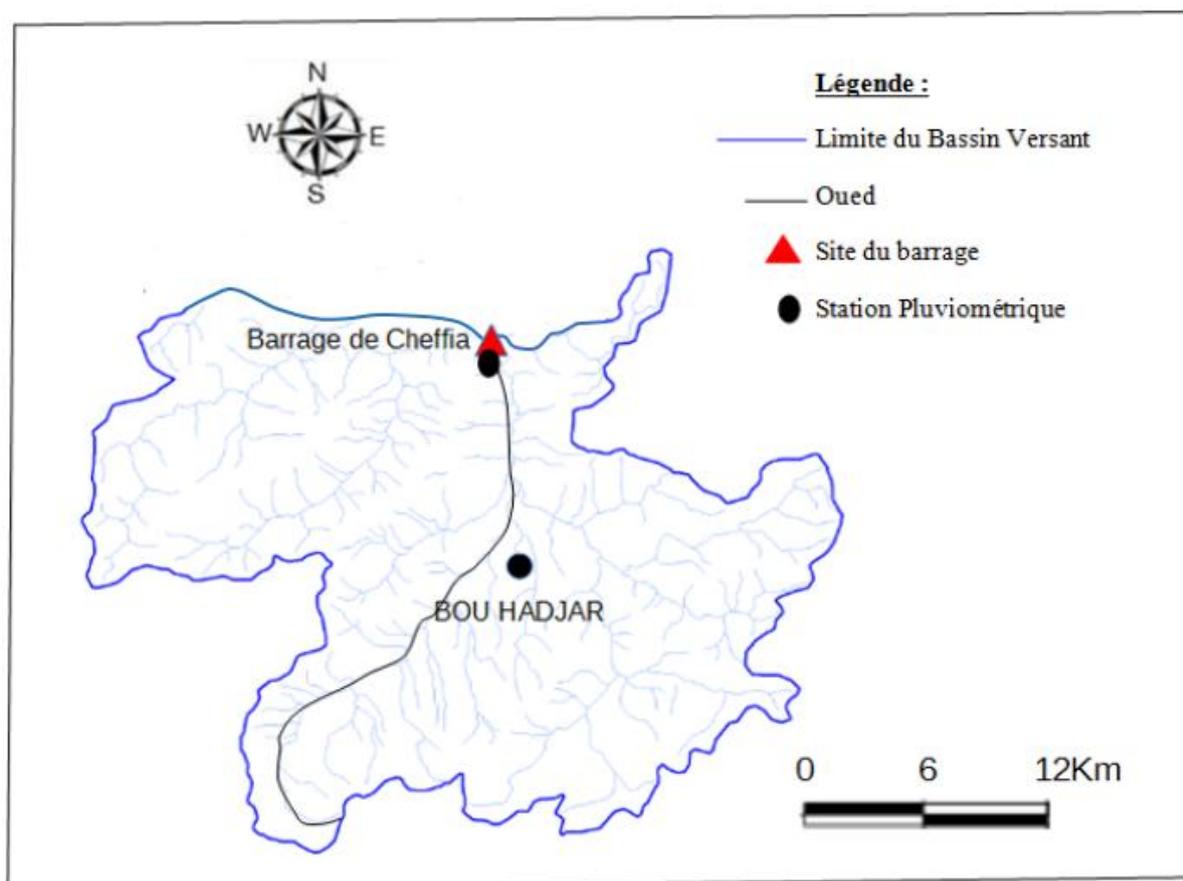


Figure A. II 6: Bassin versant du barrage de Cheffia (ANBT, 2017)

Le bassin versant du barrage de Cheffia contient deux stations pluviométriques qui sont la station de Bouhadjar et une station au niveau du site de barrage (Tableau A. II.5).

Tableau A. II.5: Stations pluviométriques au niveau du bassin versant

Station	Code	Coordonnées géographiques		Altitude (m)
		X (Km)	Y (Km)	
Bouhadjar	031503	984,20	369,75	300
Barrage	031501	977,15	381,30	170

(ANRH, 2017)

### 3. Précipitations

Les précipitations moyennes mensuelles sur le site du barrage pour une période allant de 1970/71 à 2015/16, sont récapitulées dans le tableau A. II.6.

Tableau A. 6 : Précipitations moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total annuel
Précipitation moyenne (mm)	44,03	68,32	98,60	114,15	119,96	103,77	89,46	88,69	51,35	18,38	3,44	9,93	810

(ANRH, 2017)

### 4. Température

Le barrage de Cheffia est influencé par un climat Méditerranéen, avec des valeurs minimales pendant les mois de Décembre et Janvier, correspond jusqu'à 17 C°. Tandis que les valeurs maximales coïncident avec les mois de Juillet et Août, correspond jusqu'à 35 C°.

Tableau A. II.7: Températures moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Température moyen (C°)	32,36	27,72	22,26	18,04	17,03	18,65	21,01	23,16	26,35	31,77	34,75	35,34

(ANRH, 2017)

## 5. Apports liquides

Les apports mensuels sont reconstitués à partir de l'équation du bilan hydrique pour une période de 1996/97 à 2015/16. Les apports moyens annuels sont représentés dans la figure A. II.7.

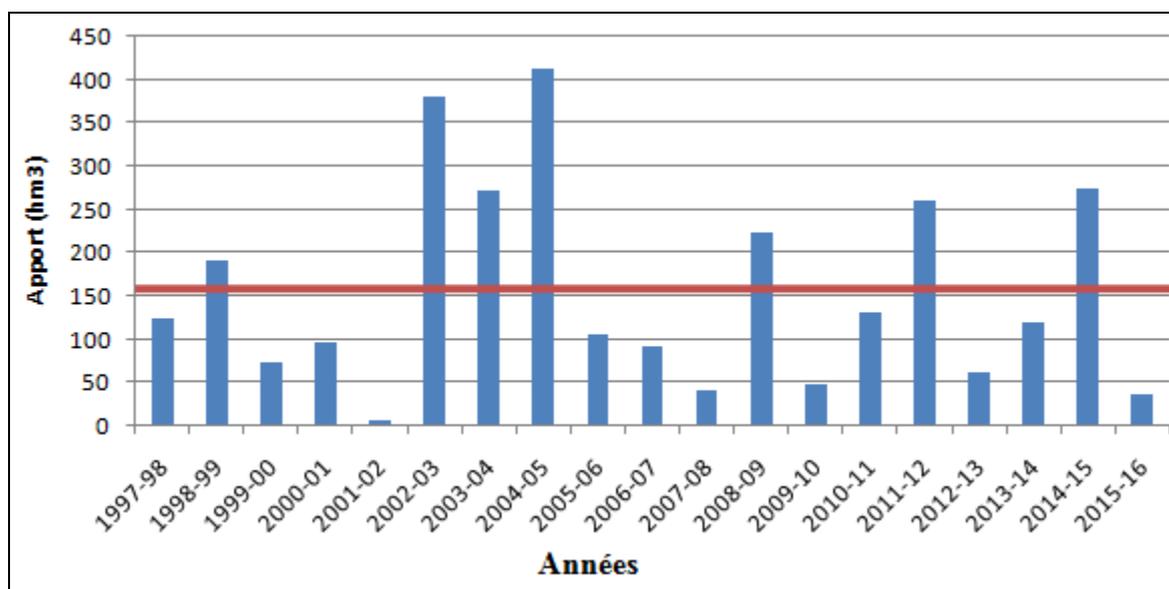


Figure A. II.7 : Apport moyen annuel

L'analyse des apports annuels du barrage de Cheffia a montré une grande variation des apports annuels, ainsi, où les apports peuvent passer d'une valeur très faible à une valeur relativement élevée d'une année à l'autre, comme nous l'avons constaté entre les années 2001/02 et 2002/03.

Nous constatons ainsi, une hausse énorme des apports entre les années 2002/03 et 2004/2005, avec une valeur qui dépassent largement l'apport moyen annuel, soit 155 Mm<sup>3</sup>.

Ainsi, en prenant en compte la moyenne des apports annuels, nous remarquons que le nombre d'années sèches s'élève à 12, alors que le nombre d'années humides est de 7.

## 6. Evaporation

L'évaporation à partir de la surface du barrage de Cheffia est très intense. La lame évaporée est mesurée à partir d'un bac Colorado avec un coefficient de 0,78. Le volume maximal évaporé est enregistré au mois de juillet avec  $1,03\text{hm}^3$ . Alors qu'au mois de Janvier le volume évaporé atteint le minimum avec  $0,18\text{hm}^3$ .

Le volume net moyen annuel perdu par évaporation est estimé à  $6,12\text{hm}^3$  (Figure A. II.8), qui représentant 4% de l'apport moyen annuel.

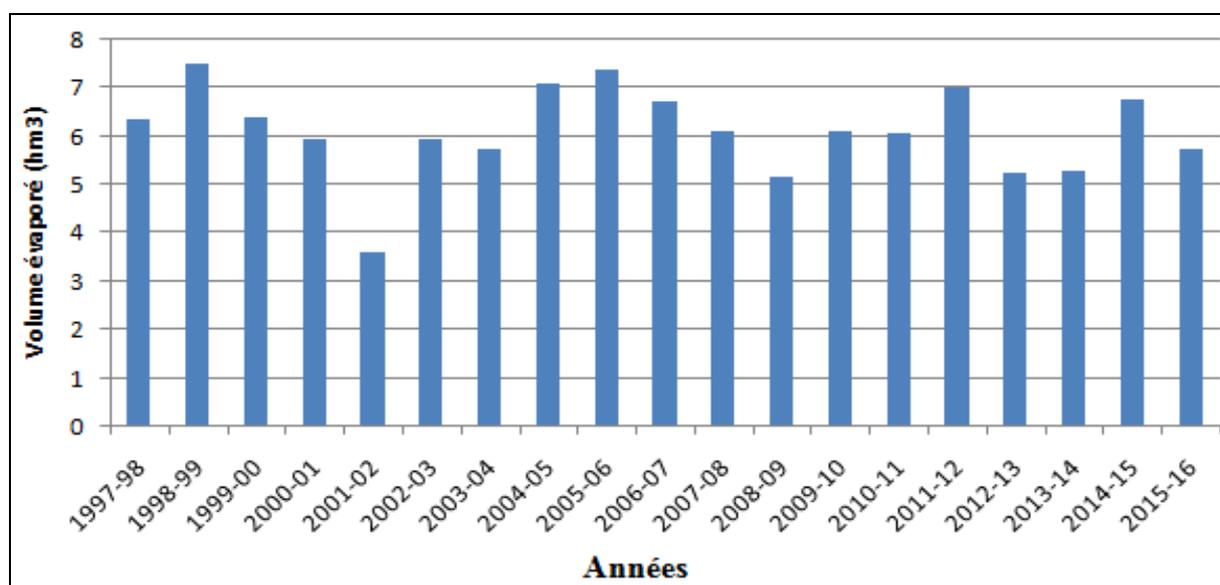


Figure A. II.8 : Volumes moyens annuels évaporés

## ANNEXE B. 3. Présentation du barrage de Foug El Gherza

### 1. Situation géographique

Le barrage de Foug El Gherza est un barrage en béton de type voute qui est situé à 20Km de l'est de la ville de Biskra. Ce barrage a été réalisé durant la période 1948-1950 pour une capacité initiale de 47 Hm<sup>3</sup>.

Plusieurs études ont été menées sur ce barrage, concernant surtout les problèmes majeurs rencontrés durant toutes ces années d'exploitations soient : l'envasement, l'évaporation et les fuites par infiltration (Benfetta et al. 2017). Après une opération de dévasement qui a été lancée en 2006 afin de récupérer une capacité de 32 hm<sup>3</sup>, seulement 4 hm<sup>3</sup> été extraites.



Figure A. II.9 : Barrage de Foug El Gherza (ANBT, 2017)

Le dernier levé bathymétrique qui a été effectué sur le barrage (ANBT, 2006), a permis de déduire les relations II. 5 et II. 6.

$$H = 183 + 0,76 * V - 0,01 * V^2 + 8 * 10^{-6} * V^3 \quad (\text{Ann B. 5})$$

$$S = 1,26 + 0,04 * V + 0,001 * V^2 - 10^{-6} * V^3 \quad (\text{Ann B. 6})$$

## 2. Caractéristiques du bassin versant du barrage de Foug El-Gherza

Le barrage de Foug El-Gherza est implanté à l'exutoire de l'Oued El Abiod qui draine un bassin versant de 1300 Km<sup>2</sup>.

Le long de l'oued El-Abiod jusqu'à l'exutoire, on dénombre quatre stations pluviométriques (Médina, Tifelfel, Tkout et la station du barrage) et une station hydrométrique (Mchouneche) (Fig A. II.10).

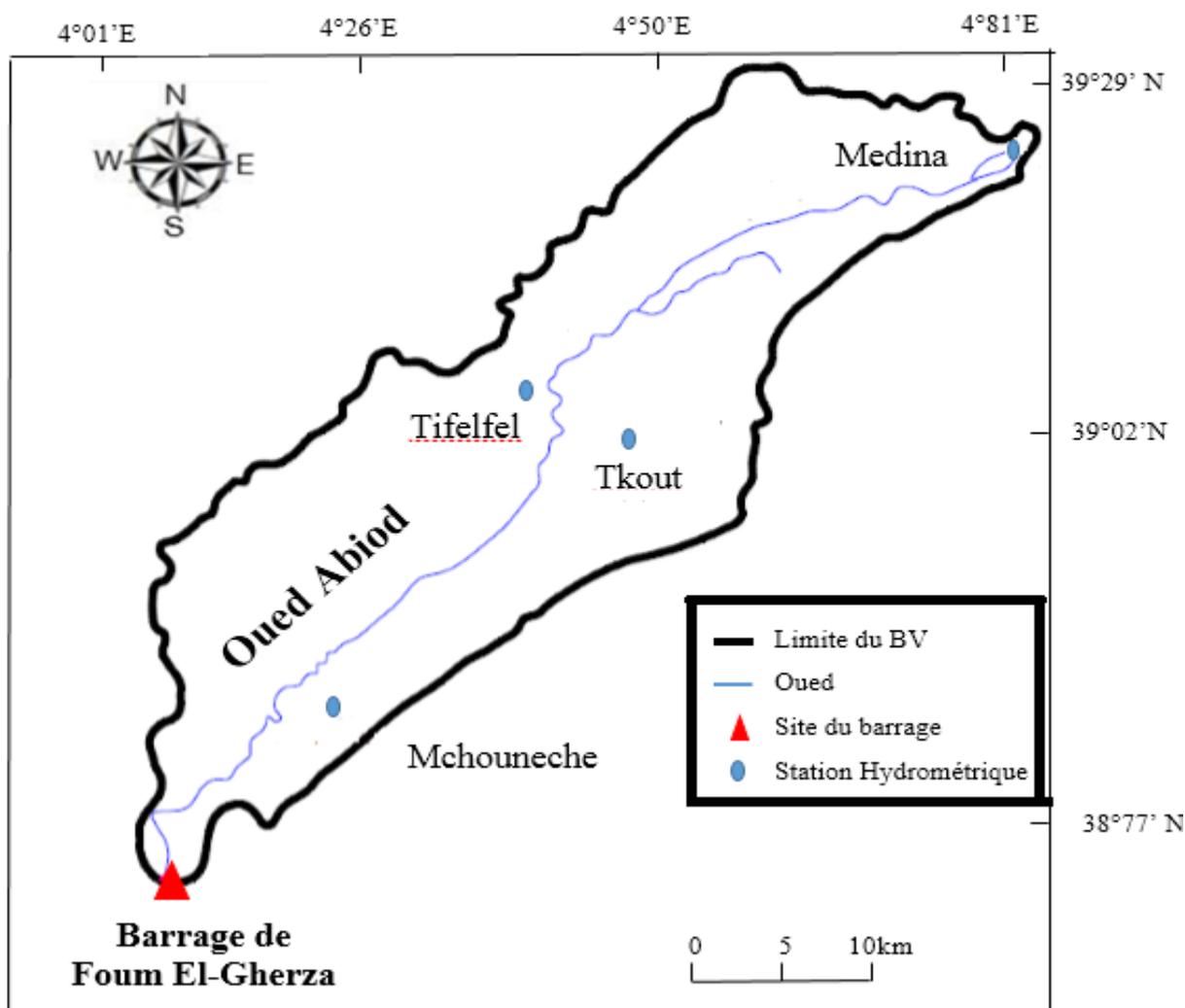


Figure A. II.10: Bassin versant au droit du barrage de Foug El-Gherza, (ANBT, 2017)

Tableau A. II.8: Stations pluviométriques et hydrométrique au niveau du bassin versant

Station	Code	Coordonnées géographiques		Altitude (m)
		X (Km)	Y (Km)	
Tifelfel	06.15.11	821,90	207,65	740
Médina	06.15.03	846,80	231,10	1450
Tkouk	06.15.05	829,00	211,00	998
Mchouneche	06.15.06	800,80	186,80	390
Barrage	06.15.01	9864,41	15631,09	200

(ANRH, 2017)

### 3. Précipitations

Les précipitations moyennes mensuelles sur le site du barrage pour une période allant de 1960/61 à 2015/16, sont récapitulées dans le tableau A. II.9

Tableau A. II.9: Précipitations moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total annuel
Précipitation moyenne (mm)	12,04	9,33	16,51	8,04	16,26	9,24	14,95	11,83	8,35	5,83	0,52	3,93	117,00

(ANRH, 2017)

#### 4. Température

Le barrage de Foum El-Gherza est influencé par un climat semi-aride, avec des valeurs minimales pendant les mois de décembre et janvier, correspond jusqu'à 11,6. Tandis que les valeurs maximales coïncident avec les mois de Juillet et Août, correspond jusqu'à 33,5.

Tableau A. II.10: Températures moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Température moyenne (C°)	28,5	22,3	16,2	11,9	11,6	13,7	15,7	19,8	24,5	29,2	33,5	32,8

(ANRH, 2017)

#### 5. Apports liquides

Les apports mensuels sont reconstitués à partir de l'équation du bilan hydrique pour une période de 1996/97 à 2015/16.

Les apports moyens annuels sont représentés dans la figure A. II.11.

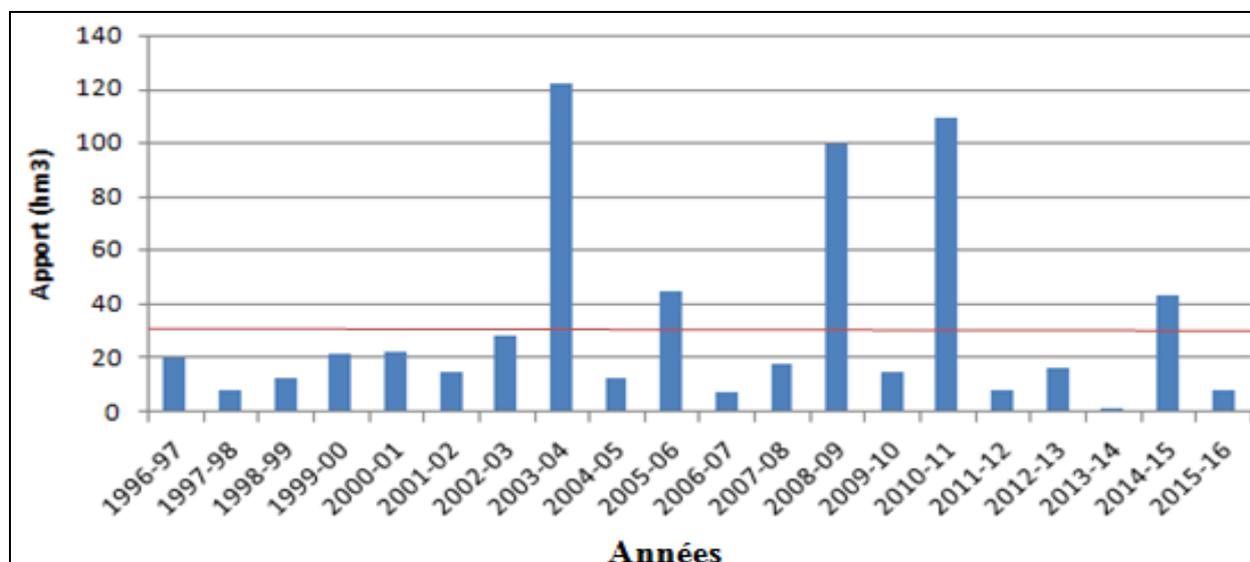


Figure A. II.11 : Apport moyen annuel

L'analyse des apports annuels du barrage de Foum El-Gherza a montré que les apports sont bien souvent inférieurs à l'apport moyen annuel, qui est de 32 Mm<sup>3</sup>. Ainsi, en prenant en compte la moyenne des apports annuels, nous remarquons que le nombre d'années sèches s'élève à 15, alors que le nombre d'années humides est de 5.

## 6. Evaporation

L'évaporation à partir de la surface du barrage de Foug El-Gherza est très intense. La lame évaporée est mesurée à partir d'un bac Colorado avec un coefficient de (0,7). Le volume maximal évaporé est enregistré au mois de juillet avec  $0,67 \text{ hm}^3$ . Alors qu'au mois de décembre le volume évaporé atteint le minimum avec  $0,11 \text{ hm}^3$ .

Le volume net moyen annuel perdu par évaporation est estimé à  $4,35 \text{ hm}^3$ , représentant 14% de l'apport moyen annuel.

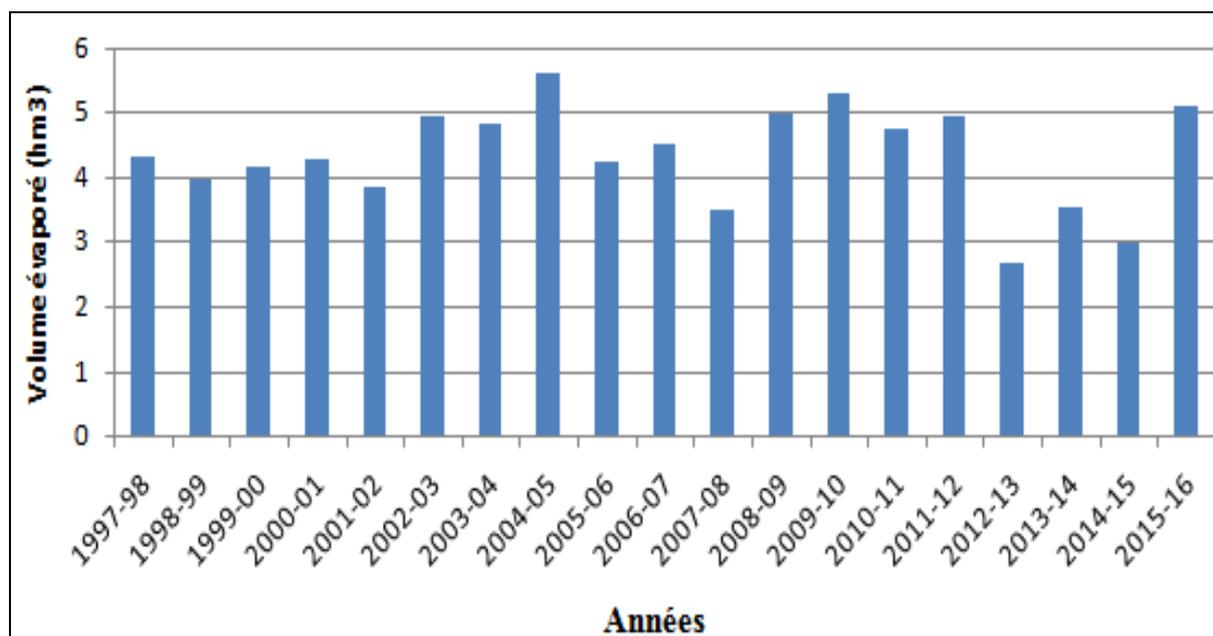


Figure A. II.12: Volumes moyens annuels évaporés

## 7. Infiltrations

Le barrage de Foug El-Gherza est l'un des barrages algériens fortement sujets au problème des infiltrations. Après la mise en eau du barrage, de nombreuses résurgences sont apparues en aval sur les deux rives.

Tableau A. II.11 : Volumes moyens mensuels des fuites

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Volume des fuites (Hm <sup>3</sup> )	0,16	0,17	0,12	0,14	0,14	0,13	0,16	0,13	0,18	0,12	0,21	0,11

(ANBT, 2017)

Le volume moyen annuel perdu par les infiltrations est estimé à 1,75 hm<sup>3</sup>, qui représente environ de 5,47% de l'apport moyen annuel.

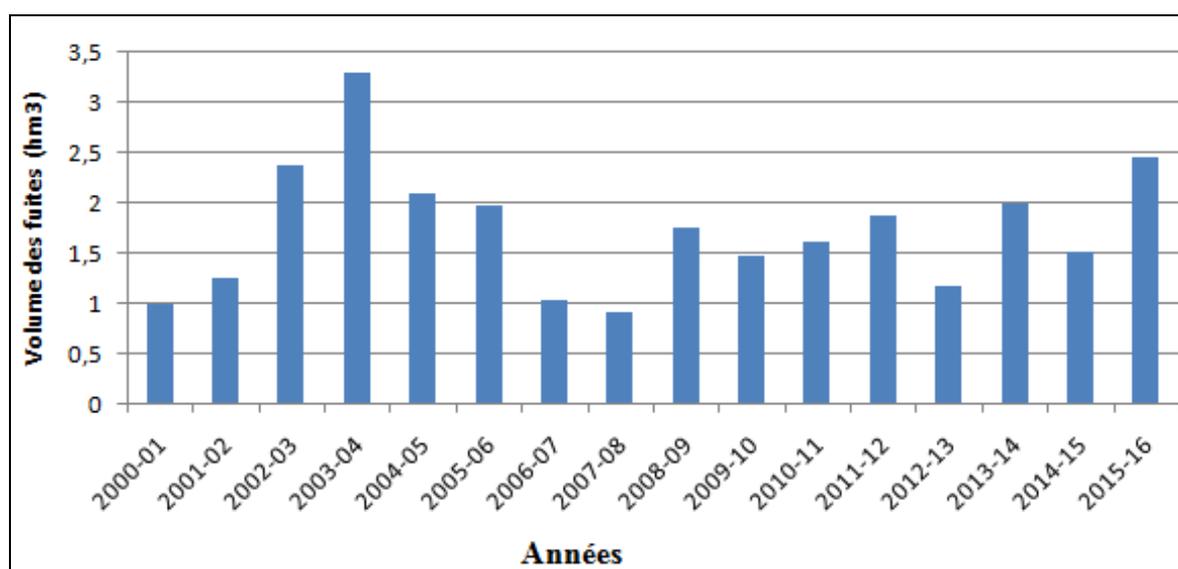


Figure A. II.13 : Volumes moyens annuels des fuites

## ANNEXE B. 4. Présentation du barrage de Cheurfa II

### 1. Situation géographique

Le barrage de Cheurfas II est un barrage poids en béton, située à 50 Km Sud-est d'Oran à proximité de la ville de Sig. Ce barrage a été construit en 1992, à l'amont de l'ancien barrage de Cheurfas I, pour une capacité de 83 Hm<sup>3</sup> (Fig A. II.14).



Figure A. II.14 : Barrage de Cheurfas II (ANBT, 2017)

Les courbes caractéristiques du barrage sont données par les relations II. 7 et II. 8.

$$H = 75,65 + 1,93 * V - 0,05 * V^2 + 3 * 10^{-6} * V^4 \quad (\text{Ann B. 7})$$

$$S = 0,28 + 0,104 * V - 0,001 * V^2 + 5 * 10^{-6} * V^3 \quad (\text{Ann B. 8})$$

## 2. Caractéristiques du bassin versant du barrage de Cheurfas II

Le barrage de la Cheurfas II est implanté à l'exutoire du sous bassin de Mebtoul, ce dernier est considéré comme le sous bassin N°4 du grand bassin versant de la Macta. Ce barrage est construit sur l'oued de Mebtoul qui résulte de la confluence des Oueds de Mekrra et Sarno, il draine un bassin versant d'environ 476 Km<sup>2</sup> de surface.

Le bassin versant du barrage de Cheurfas II contient deux stations pluviométriques qui sont la station de Bouhadjar et une station au niveau du site de barrage.

Tableau A. II.12: Stations pluviométriques au niveau du bassin versant

Nom de La station	Code de La station	Coordonnées géographiques		Altitude (m)
		X (Km)	Y (Km)	
Dar Esbaa	110401	232,02	238,15	220,00
Barrage	110402	230,27	230,63	372,00

(ANRH, 2017)

La figure A. II.15 représente le bassin versant du barrage de Cheurfas II

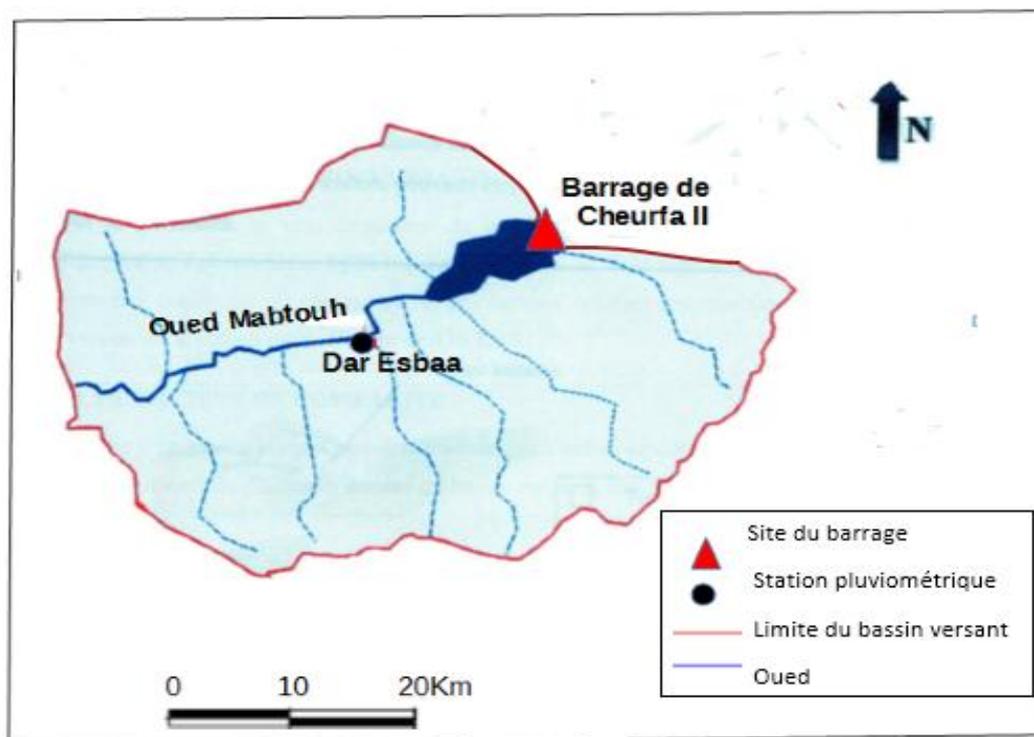


Figure A. II.15 Bassin versant du barrage de Cheurfas II (ANBT, 2017)

### 3. Précipitations

Les précipitations moyennes mensuelles sur le site du barrage pour une période allant de 1975/76 à 2015/16, sont récapitulées dans le tableau A. II.13.

Tableau A. II.13: Précipitations moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total annuel
Précipitation moyenne (mm)	11,20	21,3	35,15	35,08	32,00	32,10	31,80	25,20	19,30	3,70	1,30	2,20	250,00

(ANRH, 2017)

### 4. Température

Le barrage de Cheurfas II est influencé par un climat semi-aride, avec des valeurs minimales pendant les mois de Janvier et Février, correspond 11,8 C°. Tandis que les valeurs maximales sont enregistrées dans les mois de Juillet et Aout, correspond jusqu'à 28,7 C°.

Tableau A. II.14: Températures moyennes mensuelles

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Température moyen (C°)	23,5	20,5	15,2	12,5	11,2	11,8	14,6	15,9	20	24,3	27,5	28,7

(ANRH, 2017)

## 5. Apports liquides

Les apports mensuels sont reconstitués à partir de l'équation du bilan hydrique pour une période de 1999/2000 à 2015/16.

Les apports moyens annuels sont représentés dans la figure A. II.16.

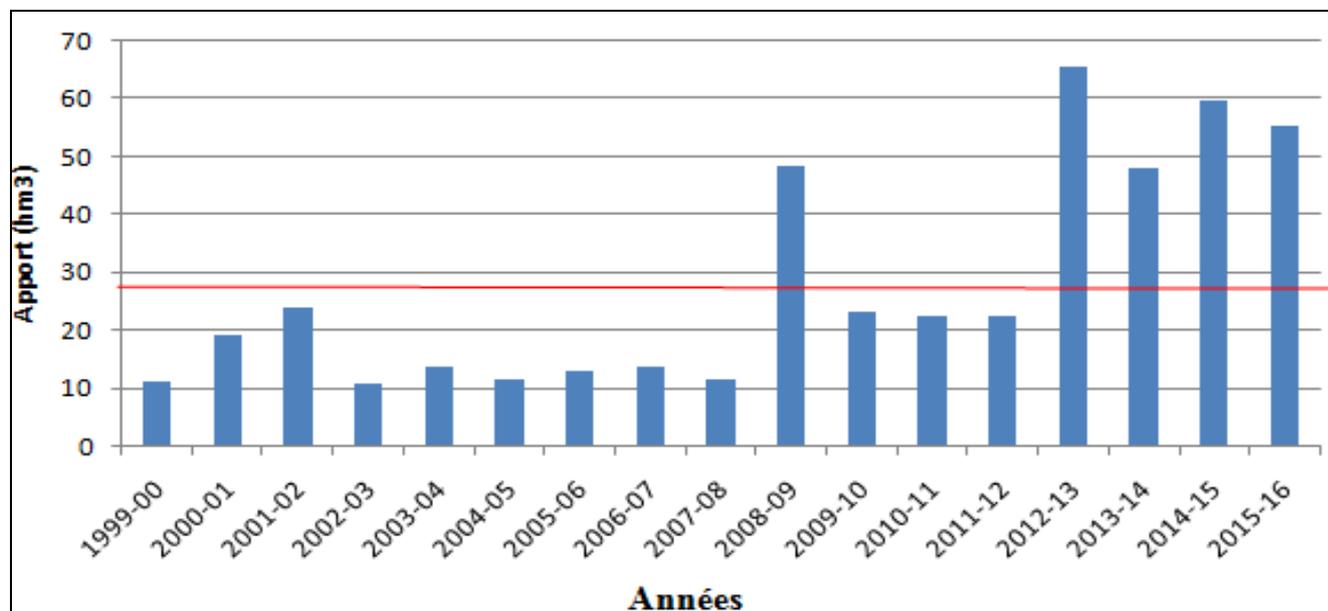


Figure A. II.16 : Apports moyens annuels

Au vu de la figure II.17, la série des apports annuels au barrage est divisée en deux périodes. La première qui s'étale de 1999/2000 à 2007/08, contient que d'années sèches avec un apport moyen de 13Mm<sup>3</sup>. Dans la deuxième période de 2008/09 à 2015/16, on dénombre plus d'années humides (5/8) que d'années sèches (3/8).

L'apport maximal est enregistré durant l'année 2012/2013, il correspond au 65Mm<sup>3</sup>

## 6. Evaporation

L'évaporation est mesurée à la station météorologique située au niveau du barrage.

Le volume net moyen annuel perdu par évaporation est estimé à 4 hm<sup>3</sup>, qui représentant 14,28% de l'apport moyen annuel. L'augmentation du volume évaporé pour les quatre dernières années est justifiée par l'augmentation de la surface du plan d'eau, résultante de l'augmentation des apports moyens annuels (Fig A. II.17).

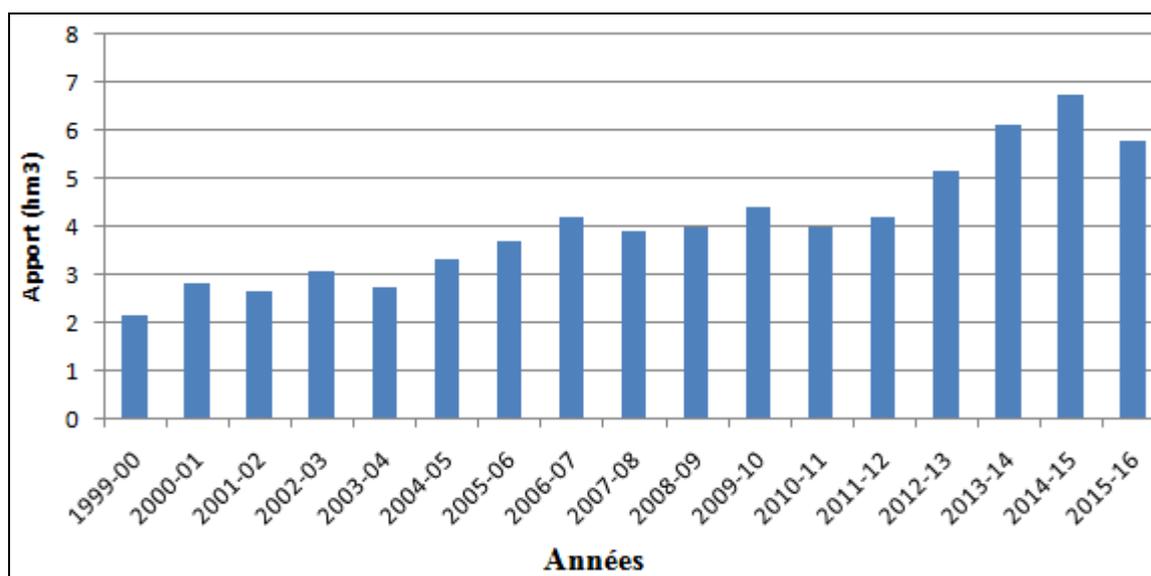


Figure A. II.17 : Volumes moyens annuels évaporés

## 7. Infiltration

Depuis son entrée en exploitation, le barrage de Cheurfas II a connu le problème d'infiltrations où des résurgences sont apparues en aval, les volumes annuels des infiltrations sont présentés dans la figure A.II.18.

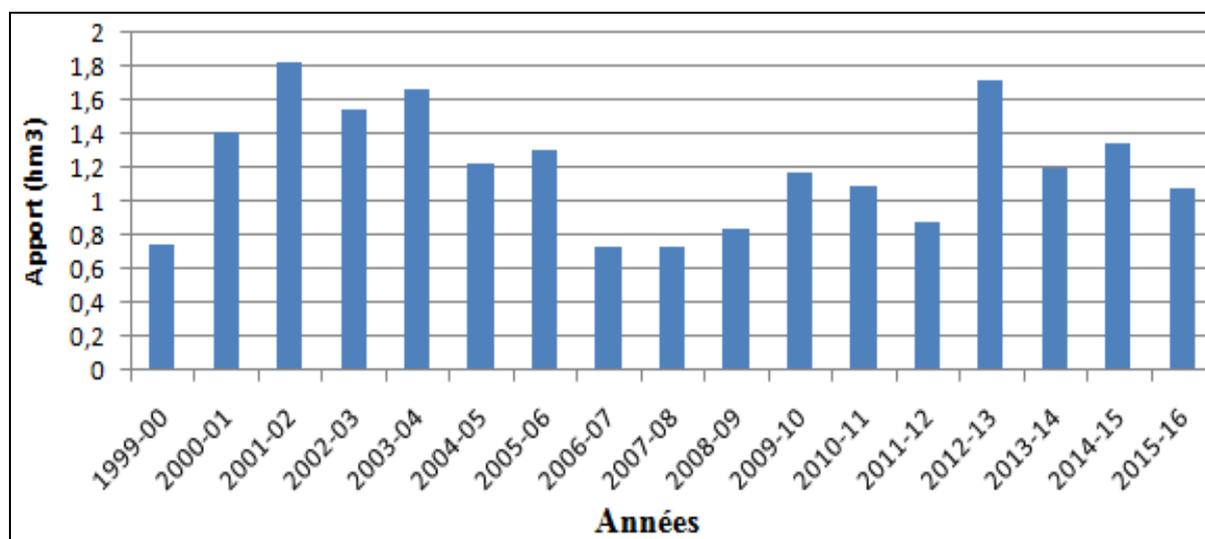


Figure A. II.18 : Volumes moyens annuels des fuites

Le volume moyen annuel perdu par les infiltrations est estimé à 1,2 hm<sup>3</sup>, représentant 4,3% de l'apport moyen annuel.

## ANNEXE C

**Exemple de calcul des lâchers optimaux par la méthode  
de la programmation dynamique déterministe (en Mm<sup>3</sup>)**

Octobre

apport	stock possible	stock objectif	lacher possible	lacher objectif	perte	stock futur	OPT 1	OPT 2	C1+C2
0,14	3	7	0,00	0,50	0,21	2,93	0,08	10,32	10,40
0,14	3	7	0,25	0,50	0,21	2,68	0,08	10,37	10,45
0,14	3	7	0,50	0,50	0,21	2,43	0,09	10,28	10,37
0,14	4	7	0,00	0,50	0,21	3,93	0,05	10,32	10,37
0,14	4	7	0,25	0,50	0,21	3,68	0,05	10,25	10,30
0,14	4	7	0,50	0,50	0,21	3,43	0,05	10,28	10,33
0,14	5	7	0,00	0,50	0,21	4,93	0,03	10,24	10,27
0,14	5	7	0,25	0,50	0,21	4,68	0,03	10,23	10,26
0,14	5	7	0,50	0,50	0,21	4,43	0,03	10,21	10,24
0,14	6	7	0,00	0,50	0,21	5,93	0,02	10,24	10,26
0,14	6	7	0,25	0,50	0,21	5,68	0,01	10,25	10,26
0,14	6	7	0,50	0,50	0,21	5,43	0,02	10,20	10,22

Novembre

apport	stock possible	stock objectif	lacher possible	lacher objectif	perte	stock futur	OPT 1	OPT 2	C1+C2
1,22	5	7	0,00	0,50	0,21	3,57	0,03	10,30	10,33
1,22	5	7	0,25	0,50	0,21	3,32	0,03	10,30	10,33
1,22	5	7	0,50	0,50	0,21	3,07	0,04	10,30	10,33
1,22	6	7	0,00	0,50	0,21	4,57	0,01	10,29	10,32
1,22	6	7	0,25	0,50	0,21	4,32	0,01	10,30	10,33
1,22	6	7	0,50	0,50	0,21	4,07	0,00	10,30	10,33
1,22	7	7	0,00	0,50	0,21	5,57	0,01	10,29	10,32
1,22	7	7	0,25	0,50	0,21	5,32	0,00	10,29	10,32
1,22	7	7	0,50	0,50	0,21	5,07	0,00	10,29	10,32
1,22	8	7	0,00	0,50	0,21	6,57	0,01	10,28	10,31
1,22	8	7	0,25	0,50	0,21	6,32	0,01	10,29	10,32
1,22	8	7	0,50	0,50	0,21	6,07	0,00	10,29	10,32

## ANNEXE D

## Programme de simulation de la gestion d'un barrage par les réseaux de neurones

```

P = [31.91 33.52 40.73 53.17 54.63 ..... 1.6 1.8 1.6 1 0.4 0] ;
T = [32 34 40 54 57 59 58 56.6 52 48.2 ..... 42.6 44.8 47.32];
net=newff ([20 60;0 18.5;0 1.8],[20 60],[9 9],{'tansig' 'tansig'
'purelin'}, 'trainlm');

net.trainParam.epochs =2000;
net.trainParam.goal = 0.00001;

indice = fix(length(P)*0.75);

% train set
PT = P(:,1:indice);
TT = T(:,1:indice);

% valid set
PV = P(:,indice+1:end);
TV = T(:,indice+1:end);

net = train(net,PT,TT);

% la phase simulation apres training de train set
TT1 = sim(net,PT);

% la phase simulation apres training de valid set
TV1 = sim(net,PV);

%
RMSET1=sqrt((1/108)*sum((TT-TT1).^2));
RMSEV1=sqrt((1/36)*sum((TV-TV1).^2));

NashT1=(1-(sum((TT-TT1).^2)/sum((TT-(TT/length(P)*0.75)).^2)))*100;
NashV1=(1-(sum((TV-TV1).^2)/sum((TV-(TV/length(P)*0.25)).^2)))*100;

```

## ANNEXE E

## Exemple de calcul des indices de performance

D'après Loucks et Van Beek (2005). Le calcul des critères quantitatifs est illustré à partir d'un exemple très simplifié (Figure VI.1).

La ligne en tirets représente la valeur cible ou « *threshold* », telle que toute valeur inférieure est considérée insatisfaisante. Cette valeur cible divise les séries de données des deux scénarios (courbes en bleu et en rouge) en états satisfaits ou « *satisfactory* » et non satisfaits ou « *unsatisfactory* »

Sur cet exemple, on peut remarquer que le scénario 1 (courbe en bleu) présente deux épisodes de défaillance avec un échec par épisode, contrairement au scénario 2 (en rouge) où on observe juste un épisode de défaillance avec 3 échecs.

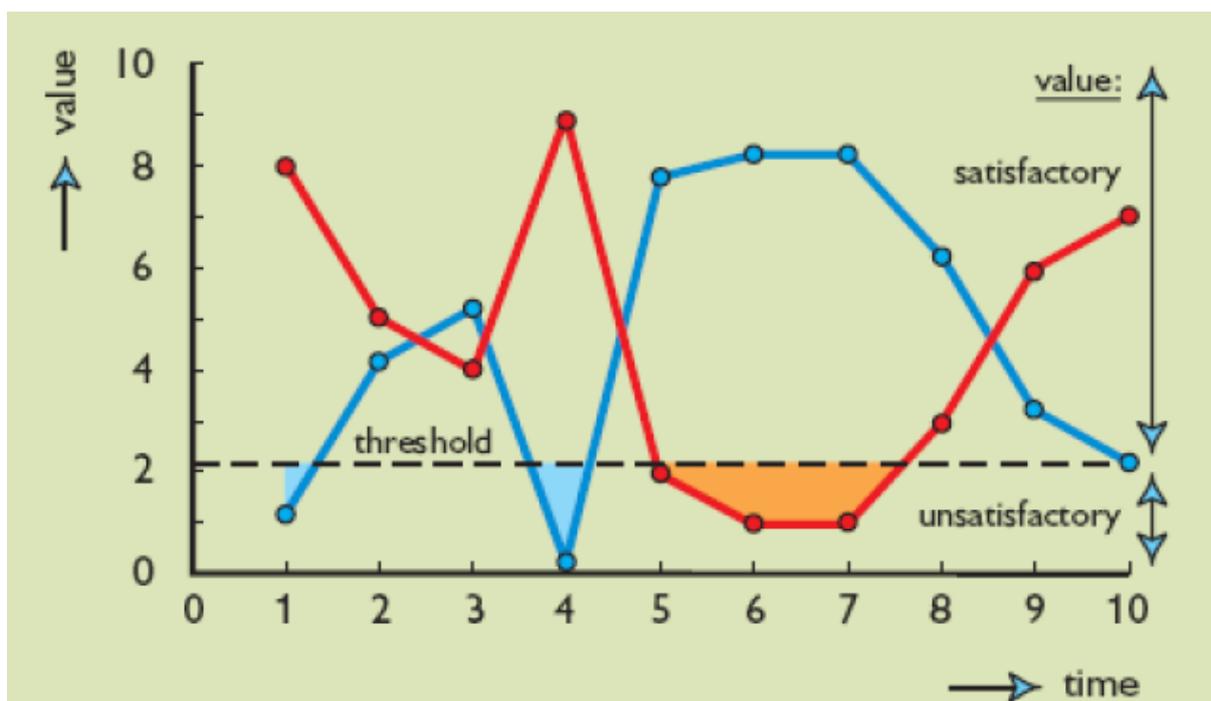


Figure A. V.1 : États de satisfaction de la demande

D'après la figure A. V.1, on peut signaler que la fiabilité correspondante au scénario 1 est 80%, tandis que la fiabilité du scénario 2 est 70%. Quant à la résilience, elle vaut 1 *temps-1* pour le scénario 1 et 1/3 *temps-1* pour le scénario 2. Les vulnérabilités correspondantes au scénario 1 et au scénario 2 sont respectivement 1,3 et 0,67.

D'après la figure 4.8, on peut déduire pour le scénario 1, la vulnérabilité par Haschimoto qui correspond à 1,5Mm<sup>3</sup>, alors que la vulnérabilité par Moy correspond à 2Mm<sup>3</sup>