

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf -Mila
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique



N°Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé en vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Hydraulique Urbaine

**Analyse des mesures d'auscultation du barrage de Béni-
Haroun(W.Mila)**

Réalisé par :

- Zeghilet abd elghani
- Menacer mahdi
- Latreche bahaeddine

Soutenu devant le jury :

Mme Belalit. H

Mme Boumessenegh. A

Mme Chebbah. L

M Zeghmar. A

Président

Examineur

Promoteur

Co-encadreur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement :

Tout d'abord, nous remercions Dieu, qui nous a donné ce bien, et nous vivons cette journée avec force et patience afin de soumettre ce travail. Nous tenons à remercier notre superviseur Dr .Chebbah Linda qui a proposé ce travail et l'a dirigé. Et le professeur Z. Amer Qui a été crédité d'avoir terminé le travail et nous tenons à remercier le président du jury et les membres du jury d'avoir accepté le verdict sur ce travail. Nous tenons à remercier les enseignants et tout le personnel du Département Hydraulique. Ce travail que nous avons fait est redevable à de nombreuses personnes spécifiques pour lequel nous tenons à remercier sincèrement. Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou Alors maintenant à ma formation et à mettre cet humble message.

Dédicace :

*Je dédie ce modeste travail :
A mes parents, en guise de reconnaissance et de gratitude
pour
tous les sacrifices qu'ils ont faits.
A mes frères Abdelhak et Youcef et mes
soeurs Fadila et Nassira et amel, à qui je dois tous l'amour
avec tous mes voeux
de les voir réussir dans leurs vies.
A mes amies, à qui je souhaite le succès, pour l'amitié qui
nous a
toujours unis.
A tous ceux qui me sont trop Chers et que j'ai omis de citer.
Enfin à toute ma Promotion
« 2022 – 2023 »*

Abd elghani

J'ai toujours voulu donner quelque chose à ma mère en signe de gratitude pour avoir fait de moi l'homme que je suis aujourd'hui, et voici l'opportunité; à qui je la préfère à moi et pourquoi pas, parce qu'elle s'est sacrifiée pour moi et n'a ménagé aucun effort pour toujours me rendre heureuse, Chère Maman, À Papa, propriétaire d'une biographie parfumée et d'une pensée éclairée, parce que c'était le premier crédit pour mes études supérieures, Dieu a accordé la paix à son âme. Et tous mes frères et mon soutien dans la vie ; Toufik, Abdelatif, Abdelmalek, Sabre, Noureddine et mes sœurs ; chahrazed, Hanane, Kenza ; à mes amis ; Zineddine, Islam, anour, Amar, charaf, Raouf, nasro ; à qui ma mère n'a pas donné naissance, mais mes sœurs, Dounia, Sounia, et tous avec qui j'ai passé du temps.

MAHDI

"À mes parents (moussa, menouba) et mon frère ahmed mouad, ma soeur khouloud, et mon oncel Abdelmadjid ma tente houria, mon grand-père derradji, et tous ma famille qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu tout au long de mon parcours académique. Votre amour inconditionnel et votre encouragement constant ont été les piliers de ma réussite. Je vous suis infiniment reconnaissant pour tous les sacrifices que vous avez faits pour me permettre de réaliser mes rêves. Cette réussite est aussi la vôtre, et je dédie ce mémoire à votre amour et votre soutien sans faille.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à mes professeurs et mentors qui m'ont guidé avec patience et bienveillance.

Je tiens à remercier mes amis et camarades de classe pour les moments de partage, les discussions stimulantes et le soutien mutuel. Votre présence et votre amitié ont rendu cette aventure universitaire inoubliable.

Enfin, je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont été touchées par le sujet de ma recherche. Que ce travail puisse apporter une contribution significative et aider à faire progresser notre compréhension dans ce domaine.

*Mes amis : achref, souhib, anis, dhiaeddine, mouad, younas, iyad, abdelhak, tarek, ahmed, adnane, oussama, sami, aissa, wail, mahdi, asil, badis, wassim, islam, nouraddine, ahmed, haroun,
mon camarades de classe : mahdi, abdelghani, chahinaz, dounia,
je m'incline :*

Mon grand-père mezmaz Laamaki, grand-mère Djouhra, grand-mère Laatra

Bahaeddine

Résumé :

La surveillance des barrages fournit des séries de mesures chronologiques issues de différents dispositifs équipant l'ouvrage. Ces mesures doivent être analysées afin de déterminer le comportement du barrage par rapport aux facteurs (pression hydrostatique, température, humidité, précipitations...etc.) influant sur sa stabilité. La sommation des effets climatiques, poussée eau/terre et thermique à une influence très importante sur la déformation du barrage dans le temps.

Le présent travail, porte sur l'analyse d'un ensemble de mesures thermiques, piézométriques et pendulaires, du barrage Béni-Haroun (Wilaya de Mila-Algérie) en utilisant l'intelligence artificielle « Réseau de Neurones Artificiels (RNA) ».

L'application de l'RNA a porté sur les mesures de déplacement de pendules du barrage de Béni Haroun, sur une période de 7 ans (2011-2017). Les résultats obtenus de la simulation indiquent que la performance du modèle FFBP est meilleure que celle du modèle CFBP.

Mot clés : Barrage de Beni Haroun, auscultation, piézométrie, déplacement, Réseau de Neurone Artificiel (RNA).

Abstract:

Dam monitoring provides a series of chronological measurements from various devices fitted to the structure. These measurements must be analysed to determine the behaviour of the dam in relation to the factors (hydrostatic pressure, temperature, humidity, precipitation, etc.) influencing its stability. The sum of climatic, water/earth pressure and thermal effects has a very significant influence on the deformation of the dam over time.

This study analyses a set of thermal, piezometric and pendular measurements from Béni-Haroun dam (Wilaya of Mila-Algeria) using the artificial intelligence "Artificial Neural Network (ANN)".

RNA was applied to the displacement measurements of pendulums at Béni Haroun dam over 7 years (2011-2017). The simulation results show that the FFBP model performs better than the CFBP model.

Key words: Beni Haroun dam, auscultation, piezometry, displacement, Artificial Neural Network (ANN).

ملخص:

توفر مراقبة السدود عبر أجهزة مختلفة في الهيكل سلسلة من القياسات الزمنية. ومن أجل تحديد سلوك السد يجب تحليل هذه القياسات التي تتعلق بعوامل كثيرة منها (الضغط الهيدروستاتيكي، درجة الحرارة، الرطوبة، الأمطار ... إلخ.) والتي لها تأثير كبير على استقراره. إن جمع التأثيرات المناخية، ضغط المياه / الأتربة على السد والتغيرات الحرارية لها تأثير كبير جدًا على تشوه السد مع مرور الوقت.

يتعلق هذا العمل بتحليل مجموعة من القياسات كالحرارة، البيزومتري والإزاحة، لسد بني هارون (ولاية ميلة. الجزائر) باستخدام الذكاء الاصطناعي "شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية (RNA)

ان تطبيق RNA على قياسات الإزاحة لسد بني هارون، على مدى 7 سنوات (2011-2017) تشير الى ان نتائج التي تحصلنا عليها من المحاكاة أن أداء نموذج FFBP أفضل من أداء نموذج CFBP.

الكلمات الرئيسية: سد بني هارون، التسمع، البيزومتري، الإزاحة، شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية (RNA)

Liste des abréviations :

ANBT : Agence National des Barrages et Transfert.

GNSS : Global Navigation satellite system.

HST: Hydrostatique, Saison, Temps.

HSTP: Hydrostatique, Saison, Temps, Pluviométrie.

HSTT: Hydrostatique, Saison, Temps, Température.

FFBP: feed-forward backpropagation.

CFBP: Cascade_forward backpropagation.

RNA: Réseaux de neurones artificiels

RMSE : root mean square error

NSE : L'efficacité de Nash-Sutcliffe

R² : Le coefficient de détermination

ESN: L'efficacité de simulation de Nash-Sutcliffe

BCR: béton compacté au rouleau

AEP: l'alimentation en eau potable

BCV: béton conventionnel vibré

MCE: maximum credible earthquake

DBE: design basis earthquake

MEF : méthode des éléments finis

ANBT : l'Agence Nationale des Barrages et Transferts

P III R T 140 : (P : pendule, III. numéro du profil, R radiale, T transversal, D : droite)

PO II 1 : P : piézomètre, II : numéro du profil, 1 n de piézomètre dans le profil

RG : Rive Gauche

RD : Rive Droite

Sommaire :

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

Introduction Générale

Chapitre I : Généralité sur les barrages

I.1 Introduction :.....	3
I.2 Généralité :.....	3
I.3 Histoire :.....	4
I.4 Les barrages en Algérie:.....	4
I.5 Types de barrages :.....	5
I.5.1 Barrages souples :.....	5
I.5.1.1 Barrage en terre homogène :.....	6
I.5.1.2 Barrage à noyau :.....	7
I.5.1.3 Barrage à masque :.....	7
I.5.1.4 Barrage en enrochement :.....	8
I.5.2 Barrages rigides :.....	8
I.5.2.1 Barrage en béton :.....	9
I.5.2.2 Barrage-poids :.....	9
I.5.2.2.1 Avantages d'un barrage-poids :.....	11
I.5.2.2.2 Inconvénients d'un barrage-poids :.....	11
I.5.3 Barrages à contreforts :.....	11
I.5.3.1 Avantages d'un barrage à contrefort :.....	12
I.5.3.2 Inconvénients d'un barrage à contrefort :.....	13
I.5.4 Barrage-voûte :.....	13
I.5.4.1 Avantages d'un barrage voûte :.....	14
I.5.4.2 Inconvénients d'un barrage voûte :.....	14
I.6 Fonctions d'un barrage :.....	14
I.6.1. Etanchéité :.....	14
I.6.2. Stabilité :.....	15
I.6.3 Equipements :.....	15
I.7 Matériaux de construction :.....	16
I.8 Choix du site du type de barrage :.....	17

I.8.1 Conditions topographiques :.....	17
I.8.2 Morphologie de la vallée considérée :.....	17
I.8.3 Données géologiques et géotechniques :.....	17
I.8.4 Matériaux utilisés :.....	18
I.8.5 Risque sismique :.....	19
I.8.6 Conditions climatiques :.....	19
I.8.7 Crues et ouvrages hydrauliques :.....	19
I.8.8 Critères économiques :.....	20
I.9 Rupture des barrages en terre :.....	20
I.9.1 Causes de rupture des barrages en terre :.....	20
I.9.1.1 Problèmes techniques :.....	20
I.9.1.2 Causes naturelles :.....	20
I.9.1.3 Causes humaines :.....	21
I.9.2 Types de ruptures :.....	21
Conclusion :.....	21

Chapitre II : Les systèmes d'auscultation

II.1. Introduction :	22
II.2. Surveillance et auscultation :	22
II.2.1. Généralités :	22
II.2.2. Objectifs de la surveillance :.....	23
II.3. Auscultation des barrages :	23
II.3.1. L'inspection visuelle :.....	23
II.3.2. L'auscultation instrumentale :	24
II.5. Choix du dispositif d'auscultation :.....	25
II.6. Types d'auscultation :.....	25
II.7. Principe du fonctionnement du système d'auscultation :	25
II.8.1.1. Tassomètre :.....	26
II.8.1.2. L'inclinomètre :	26
II.8.2. Piézométrie :	27
II.8.3. Température :.....	28
II.8.5. Contraintes :	29
II.8.6. Pendule :	29
II.9. Différentes méthodes d'analyse des mesures d'auscultation du barrage :.....	31
II.9.1. Le modèle HST :.....	31

II.9.2. La méthode d'analyse ACP :	31
II.9.3. Méthodes déterministes :	32
II.9.5. La méthode d'analyse des données d'auscultation par réseau de neurones :.....	33
Conclusion :	34

Chapitre III: Présentation du site d'étude

III.1. INTRODUCTION	35
III.2. La localisation du barrage :	35
III.3. Géologie du site du barrage dans le cadre géologique régional :	36
III.5. Climatologie :	39
III.5.2. Température :	40
III.5.3. Le vent :	41
III.5.4. Evaporation :	42
III.5.5. Humidité :	42
III.6. Indique climatique :	43
III.6.1. Diagramme ombro-thermique de Bagnouls et Gaussen :	43
III.6.2. Indice de De Martonne ou d'aridité :	44
Conclusion :	45

Chapitre IV: Traitement des données et analyses des mesures

IV.1. Introduction :	46
IV.2. Piézométrie :	46
IV.2.1. Evolution temporelle :	47
❖ Rive droite :	47
❖ Rive gauche :	48
IV.2.2. Evolution spatiale :	48
IV.3. Mesure de température :	51
IV.3.1. Température de l'eau :	51
IV.3.2. Température de béton :	51
IV.4. Mesure de déplacement :	53
IV.4.1. Fondations (cote 100 m et 105 m) :	53
IV.4.2 Corps du barrage (cote 140 m) :	54
IV.4.3 La crête (cote 175 m) :	55
Conclusion :	57

Chapitre V: Prédiction du déplacement du barrage de Beni Haroun à l'aide de RNA

V.1.Introduction:	58
V.2. Données et méthodes :	58
V.2.1. Réseaux de neurones feed-forward backpropagation (FFBP) :	59
V.2.2. Réseaux de neurones Cascade_forward backpropagation (CFBP) :	60
V.3. Critères d'évaluation de la performance du modèle :	60
V.4. Résultats et discussion :	61
V.4.1. feed-forward backprop (FFBP):	61
V.4.2. Cascade_forward backpro (CFBP):	63
Conclusion :	65

Conclusion Générale

Références bibliographique

Listes des figures :

Figure I.1 : Photographie d'un barrage souple.	6
Figure I.2 : Les différents types de barrages en remblai.....	6
Figure I.3 : Barrage en terre homogène.....	7
Figure I.5 : Barrage à masque.	8
Figure I.6 : Coupe du barrage en enrochements.....	8
Figure I.7 :Les différents types des barrages en béton.	9
Figure I.8 : Coupe du barrage-poids.....	10
Figure I.9 :Barrage-poids (Barrage Béni Haroun Mila-Algérie).....	10
Figure I.10 : Coupe du barrage à contreforts.	11
Figure I.11 : Barrage à contrefort (barrage Erra Guéné Jijel-Algérie).....	12
Figure I.12 : Coupe du barrage-voûte.	13
Figure I.13 :Barrage-voûte (Barrage Tichy Haf Bejaia -Algérie).....	14
Figure I.14 : Photographie des équipements de sécurité.	16
Figure. II.1. : Auscultation topographique.....	26
Figure II.2. : Cellule de tassement à boule.	26
Figure II.3. : Sonde inclinométrique digital.....	27
Figure II.4. : Image d'un tube inclinométrique.....	27
Figure II.5. : Piézomètre. (www.wikhydro.developpement-durable.gouv.fr)	28
Figure II.6. : Capteur de température à fibre optique	28
Figure II.7. : Vinchon	28
Figure II.8. : Pendule direct.(www.sisgeo.com)	29
Figure II.9. : Exemple d'un manomètre.....	30
Figure II.10. : Fonctionnement d'un neurone.....	33
Figure II.11. : Réseau de neurones à trois couches (entrée, cachée et de sortie).....	34
Figure III 1 : Situation géographique du Barrage de Béni Haroun.....	36
Figure III 2 : Géologie du site du barrage de Beni Haroun.....	37

Figure III 3 : Coupe géologique du site de barrage de Beni .Haroun.....	38
Figure III 4 : Bassin versant et réseau hydrographique de terrain d'étude.....	39
Figure III 5 : Variation de la précipitation moyenne mensuelle interannuelle de la station De Beni Haroun (2003-2019).....	40
Figure III 6 : Variation des températures mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2003-2019).....	41
Figure III 7 : Variation des moyennes mensuelles interannuelles de la vitesse du vent de la station de Beni Haroun, durant la période (2003-2019).....	41
Figure III 8 : Variation de l'évaporation dans le lac du barrage de Beni Haroun durant la période (2007-2019).....	42
Figure III 9 : Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle interannuelle de la station de Beni Haroun (2003-2019).....	43
Figure III 10 : Le diagramme ombro-thermique de Bagnouls et Gausson de la station de Beni Haroun (2003-2019).....	44
Figure III 11 : Diagramme de De Martonne.....	45
Figure IV.1 : Localisation des piézomètres autour du site de barrage de Beni Haroun.....	47
Figure IV.2 : Evolution piézométrique dans la rive droite.....	47
Figure IV.3 : Evolution piézométrique dans la rive gauche.....	48
Figure IV.4 : Circulation des eaux souterraines dans la nappe calcaire au cours de la construction du barrage.....	49
Figure IV.5 : Piézométrie des fondations du barrage de Beni Haroun (Février 2019).....	50
Figure IV.6 : Evolution temporelle de la température de l'eau (2011-2018).....	51
Figure IV.7 (à, b) : Evolution temporelle de la température du béton (2011-2021).....	52
Figure IV.8 : Emplacements et numéros des pendules du barrage Béni-Haroun.....	53
Figure IV.9 : Evolution temporelle du déplacement des pendules à la cote 100 m, au niveau du barrage de Beni Haroun (2012 - 2021).....	54
Figure IV.10 (a, b) : Evolution de déplacement pendules (cote 140) au niveau du barrage de Beni Haroun (2012 - 2021).....	55
Figure IV.11(a, b) : Evolution temporelle de déplacement des pendules (cote 175), au niveau du barrage de Beni Haroun (2012 -2021).....	57
Figure V.1. Schéma général du modèle FFBP et CFBP pour la prédiction du déplacement du barrage.....	59
Figure V.2. Graphique de régression du tracé du FFBP.....	62

Figure V.3. Le déplacement prédit par modèle FFBP par rapport le déplacement mesuré (valeur cible).	62
Figure V.4. Comparaison entre le déplacement mesuré et le déplacement simulé (FFBP).....	63
Figure V.5. Graphique de régression du tracé du (CFBP).....	63
Figure V.6. Le déplacement prédit par le modèle (CFBP) par rapport le déplacement mesuré (valeur cible).	64
Figure V.7. Comparaison entre le déplacement mesuré et le déplacement simulé (CFBP)...	64
Figure V.8. Le déplacement prédit par les modèles (FFBP) et (CFBP) par rapport le déplacement mesuré (valeur cible).....	65

Listes des tableaux :

Tableau I.1 : Choix du type du barrage en fonction de la géologie de la vallée.....	18
Tableau II.1 : Instruments et moyens de mesure pour les barrages en béton.....	30
Tableau III.1 : précipitation moyennes (2003-2019).....	39
Tableau III.2 : Températures moyennes mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2003-2019).....	40
Tableau.III.3 : Moyennes mensuelles interannuelles de la vitesse du vent de la station de Beni Haroun, durant la période (2003-2019).....	41
Tableau.III.4 : évaporation moyennes mensuelles interannuelles de la station de Beni haroun (2007-2019).....	42
Tableau III.5 : Humidité relative moyennes mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2003-2019).....	43
Tableau IV.1 : Déplacement des pendules a la cote 140 m (2012-2021).....	54
Tableau IV.2 : Déplacement des pendules a la cote 175 m (2012-2021).....	56
Tableau V.1. Performances de la prédiction (FFBP, CFBP).....	64

INTRODUCTION GENERALE :

L'eau est un élément essentiel, indispensable pour la vie et pour le développement socio-économique réel et durable de tout pays.

Dans ce dernier siècle évidemment, le changement climatique et l'augmentation de la population mondiale a entraîné un accroissement de la demande en eau ; Une grande attention a été accordée à la création de grandes réserves d'eau par le biais de la construction des barrages, qui a connu un développement majeur dans le monde.

Les barrages sont des constructions spécifiques qui en cas de rupture peuvent causer des catastrophes immenses. Ils peuvent être affectés par un ensemble de désordres, perte d'étanchéité, glissement, érosion qui influent sur leur performance.

Pour garantir un niveau élevé de sécurité des barrages et pour minimiser les risques éventuels d'endommagement, il faut assurer une grande stabilité à l'ouvrage. La conception des barrages est une tâche difficile et compliquée, elle intègre nombreux critères, telle que la topographie, la géologie, l'hydrologie et la qualité des matériaux...etc.

La sécurité des barrages ne dépend pas seulement d'une construction adéquate, mais aussi de la surveillance du comportement réel pendant la mise en eau, et tout au long de l'exploitation des barrages pour s'assurer un bon comportement de l'ouvrage.

L'instrumentation, par le biais de l'auscultation permet, entre autre de mesurer la déformation des ouvrages qui résulte des agents internes et externes (température, précipitation, infiltration, débits et caractéristiques des matériaux...etc.).

La surveillance des barrages a pour objectif de prévenir leur dégradation sur le long terme, d'assurer sa sécurité, d'entretenir leur fonctionnement dans de bonnes conditions. La surveillance et l'auscultation sont préalables à toute opération d'entretien et doivent entrer en jeu dès la construction de l'ouvrage. Cette surveillance repose sur deux piliers complémentaires : l'inspection visuelle de caractère qualitatif et les mesures de paramètres représentatifs de caractère quantitatif est plus ponctuel. Elle contribue à la garantie de la sécurité à court, moyen et long terme des ouvrages et permet une meilleure planification des actions de maintenance à entreprendre.

Pour émettre un jugement sur le comportement d'un ouvrage, il faut notamment disposer de mesures continues de bonne qualité et les exploiter correctement en mettant en œuvre tous les moyens disponibles pour tirer un maximum d'informations.

Notre travail consacré premièrement à une analyse des mesures d'auscultation du barrage de Beni Haroun dont le but de vérifier sa stabilité après 20 ans de fonctionnement. Les paramètres étudiés sont : la piézométrie, la température eau/béton et le déplacement. Deuxièmement on tente à faire une simulation à l'aide de l'intelligence artificielle « réseaux de neurone » par deux méthodes pour titrer la meilleure méthode de prédiction du déplacement.

Le mémoire est structuré de la façon suivante :

- Le chapitre 1 présente à la fois une bibliographie et des généralités sur les barrages, ainsi que les critères de choix des sites et des types de barrages, aussi les causes et types de leurs ruptures ;
- Dans le chapitre 2, on présente les systèmes d'auscultation, leurs objectifs, leurs fonctionnements, ainsi les différentes méthodes d'analyse des mesures d'auscultation des barrages ;
- Le chapitre 3, c'est une description générale du site d'étude « barrage Beni Haroun » tel que, sa situation géographique, géologique, hydrologique et climatique....etc ;
- Le chapitre 4 consacré à une analyse des différentes mesures d'auscultation du barrage de Beni Haroun : température (eau, béton), piézométrie et déplacements ;
- Le chapitre 5 représente la simulation du déplacement en utilisant l'intelligence artificielle « réseaux de neurones artificiels » ;
- Et enfin, une conclusion générale et perspectives.

Chapitre I: Généralité sur les barrages

I.1 Introduction :

Le barrage (ou digue) est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau, il permet la rétention des eaux pour diverses utilisations. Historiquement, les barrages furent construits afin de répondre à un seul problème, l'approvisionnement en eau et l'irrigation. Avec le développement des civilisations, les besoins furent plus importants et plus nombreux, ajoutant aux précédents la nécessité de contrôler les crues, la navigation, la qualité de l'eau, le contrôle des sédiments et l'énergie. Par conséquent des barrages ont été construits pour répondre à ces besoins spécifiques. Un Barrage est la pierre angulaire dans le développement et la gestion des ressources hydrauliques. Les barrages polyvalents sont des projets très importants pour les pays en développement, puisqu'un seul investissement permet aux populations de recevoir des bénéfices à la fois domestiques et économiques.

A travers ce chapitre, on va découvrir les différents types des barrages existants, leurs fonctions, les facteurs influents sur la stabilité de ces ouvrages, les destructions apparaissant sur leur structure ainsi que les moyens permettant le suivi leur comportement.

I.2. Généralité :

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à enretenir l'eau. Par extension, on appelle barrage tout obstacle placé sur un axe de communication et destiné à permettre un contrôle sur les personnes et/ou les biens qui circulent (barrage routier, barrage militaire).

Quand le barrage est submersible, on parle plutôt de chaussée ou de digue (ce dernier terme est également préféré à celui de barrage lorsqu'il s'agit de canaliser un flot et non de créer une étendue d'eau stagnante).

Un barrage fluvial permet par exemple la régulation du débit d'une rivière ou d'un fleuve (favorisant ainsi le trafic fluvial), l'irrigation des cultures, une prévention relative des catastrophes naturelles (crues, inondations), par la création de lacs artificiel sous de réservoirs. Un barrage autorise aussi, sous certaines conditions, la production de force motrice (moulin à eau) et d'électricité (barrage hydroélectrique), à un coût économique acceptable, le coût environnemental étant plus discuté (fragmentation éco paysagère, phénomènes d'envasement à l'amont du barrage, dégradation de la qualité de l'eau).

Toutefois, plus un projet est ambitieux, plus ses conséquences sont lourdes : ennoyant des vallées entières, la construction d'un barrage peut provoquer à la fois des bouleversements

humains en forçant des populations entières à se déplacer, et avoir un impact écologique non négligeable en changeant fondamentalement l'écosystème local.

Les barrages sont construits dans le monde entier pour différents usages :

- **Irrigation** des cultures, en particulier dans les régions arides ou semi-arides.
- **Alimentation en eau** des hommes et des animaux, ainsi que des entreprises et de l'industrie.
- **Nivellement des crues**
- **Production** d'énergie électrique
- **Régularisation des rivières navigables et alimentation des canaux** (eau de consommation des écluses).
- **Flottage** du bois coupé (Canada).

Alimentation des industries en eau de refroidissement (centrales thermiques par exemple).

Pisciculture ou élevage d'autres espèces animales ou végétales aquatiques.

Création de paysages, de zones de repos ou de centres sportifs [1].

I.3.Histoire :

Les barrages existent probablement depuis la préhistoire (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures) mais c'est au Moyen Âge qu'ils se sont fortement développés en Europe pour alimenter les moulins à eau. Il semble qu'ils aient parfois pu s'appuyer sur des sédiments accumulés en amont d'embâcles naturels, ou sur les lieux des barrages de castors dont la toponymie conserve des traces. Les cartes anciennes, de Cassini par exemple, portent témoignage des nombreux barrages de petites rivières faits par les paysans ou les moines locaux, pour conserver l'eau et y élever du poisson ou pour le rouissage du lin ou du chanvre.

En conservant des volumes d'eau et une hauteur d'eau plus importante en saison sèche, ces barrages ont également pu tamponner les fluctuations estivales des nappes (car toutes choses égales par ailleurs, c'est la hauteur d'eau qui contrôle la vitesse de percolation, Loi de Darcy) [1].

I.4. Les barrages en Algérie :

Selon le ministère de ressources en eau, déclaration du 27 septembre 2018 (APS) : L'Algérie a réalisé 36 grands barrages depuis l'an 2000 faisant augmenter le nombre des barrages réalisés à réceptionner d'ici 2020 à 85 barrages, a indiqué jeudi le ministre des

Ressources en eau , Hocine Necib parmi ces barrages le barrage Sou Bella dans la commune de Megra (Msila) qui fait objet de notre étude , il a été mis en service, en 2017, qui a permis une nette amélioration dans l'alimentation en eau potable (AEP) dans les communes situées à l'Est du chef-lieu de wilaya, à l'image d'oued Derradj, Oued AdiGue bala, Berthou, Megra et Belaïa ,cette nouvelle infrastructure hydraulique contribuera à alléger la facture de l'entretien des forages , source essentielle d'approvisionnement en eau potable dans cette wilaya.

D'autres barrages en exploitation en Algérie, nous citons El Hamiz à Alger ; Béni Haroun à Mila, Timgad, Taqsebt, Tichy-haf, Tilesdit, Koudiat Acerdoun... etc.

Parmi les barrages cités, Le barrage de Béni Haroun est considéré comme le plus grand barrage en Algérie avec une capacité de stockage de 960 millions de mètres cube. Équipé d'une grande station de pompage d'eau brute, dont sa puissance est de 180 MW.

Le barrage alimente en eau potable plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment les wilayas de Jijel, Constantine, Oum el Bouaghi, Batna et Kenchela. Le barrage fournit également une quantité importante d'eau d'irrigation pour quelques centaines d'exploitations agricoles dans les régions voisines.

Néanmoins, dans un contexte de croissance, les autorités poursuivent leurs projets de développement des infrastructures hydrauliques du pays, 80 sites supplémentaires ont été recensés pour la réalisation de nouveaux barrages, et 30 d'entre eux ont fait l'objet d'études de faisabilité.

L'Algérie entend faire passer à 139 le nombre total de barrages d'ici 2030, et, ce faisant, atteindre une capacité de stockage de près de 12 milliards de mètres cubes sur l'ensemble du pays [18].

I.5. Types de barrages :

Il existe deux types de barrages : les barrages souples et les barrages rigides.

I.5.1. Barrages souples :

Ce sont des barrages construits par des remblais en terre ou en enrochement ; ils sont caractérisés par une pente faible et une forte emprise au sol [22].

On distingue trois types de barrages souples :



Figure I.1. Photographie d'un barrage souple.

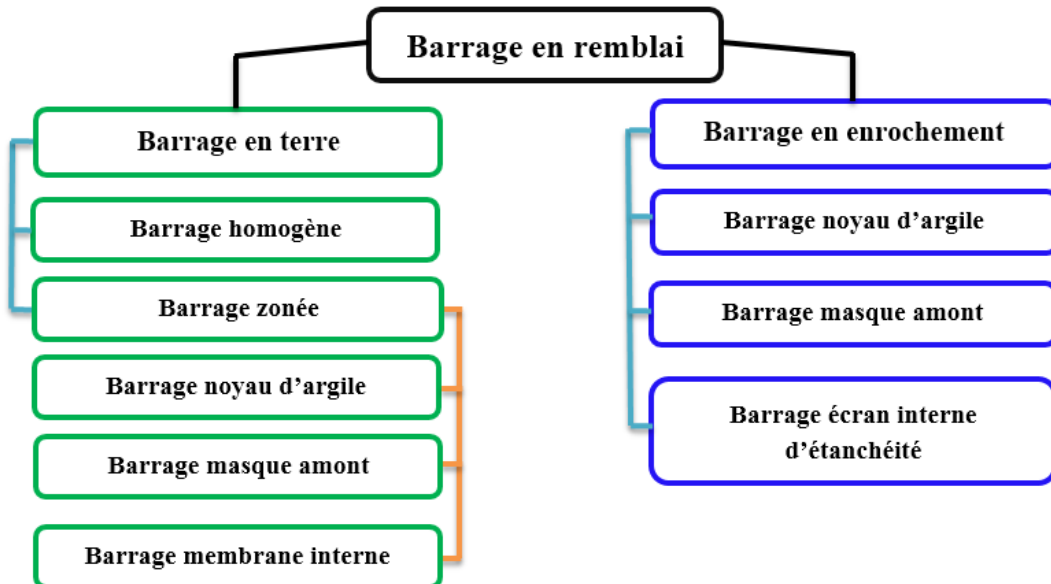


Figure I.2. Les différents types de barrages en remblai. [19]

I.5.1.1. Barrage en terre homogène :

Un barrage en terre homogène est un barrage en remblai construit avec un matériau suffisamment étanche (argile, limon). C'est la technique la plus ancienne de barrages en remblai. Il est le type de barrage le plus facile à réaliser, mais il faut prévoir un drainage efficace dans la partie aval de la digue, ainsi qu'une protection et une zone de transition en amont. Pour la réalisation d'un tel barrage, il faudrait disposer d'un volume très important de matériau argileux imperméable (Figure I.3.). Le drain vertical placé au centre de la digue constitue une solution plus efficace pour intercepter les eaux d'infiltration, il doit être constitué de matériaux grossiers (gravier et sable) [19].

Pour assurer la stabilité des parements amont et aval on réalise des talus dont la pente dépend des qualités de stabilité et de perméabilité du matériau. L'étanchéité du massif est assurée par l'épaisseur du barrage et l'imperméabilité du matériau [17].

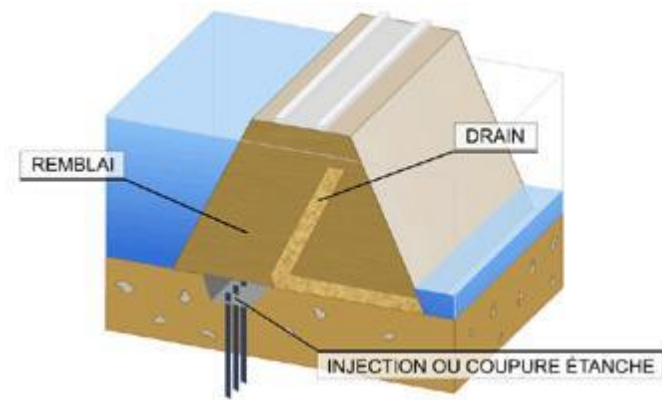


Figure I.3. Barrage en terre homogène.

I.5.1.2. Barrage à noyau :

Dans le cas où la quantité des matériaux imperméables disponibles sur site est insuffisante pour réaliser tout le corps du barrage, on opte le plus souvent pour un ouvrage à Zones avec un noyau en argile assurant l'étanchéité [21].

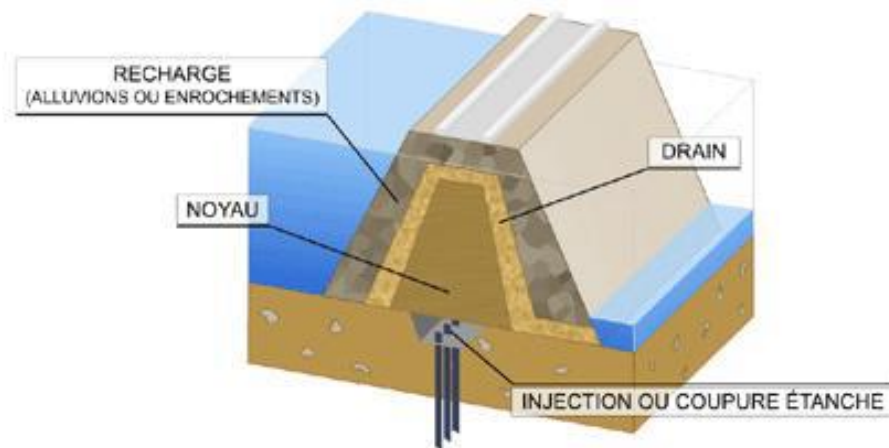


Figure I .4. Barrage à noyau.

I.5.1.3. Barrage à masque :

Il peut aussi exister des sites où aucune terre n'est disponible, mais seulement des enrochements. Ceux-ci sont alors employés pour réaliser le corps du barrage, tandis que l'étanchéité est assurée par un masque de béton, ciment ou béton bitumineux posé sur l'ouvrage lui-même dans le côté amont [23].

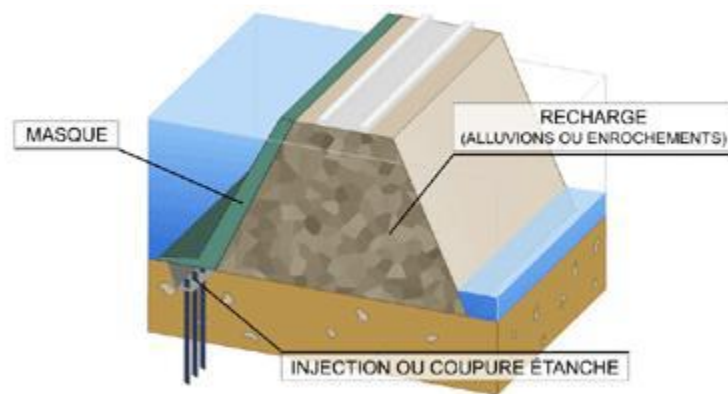


Figure I.5. Barrage à masque.

I.5.1.4 Barrage en enrochement :

Il est constitué de plusieurs types des matériaux disposés de façon à assurer séparément les fonctions de stabilité du barrage et d'étanchéité. Le découpage du corps du barrage en matériaux différents est appelé zonage (Figure I.6) [19].

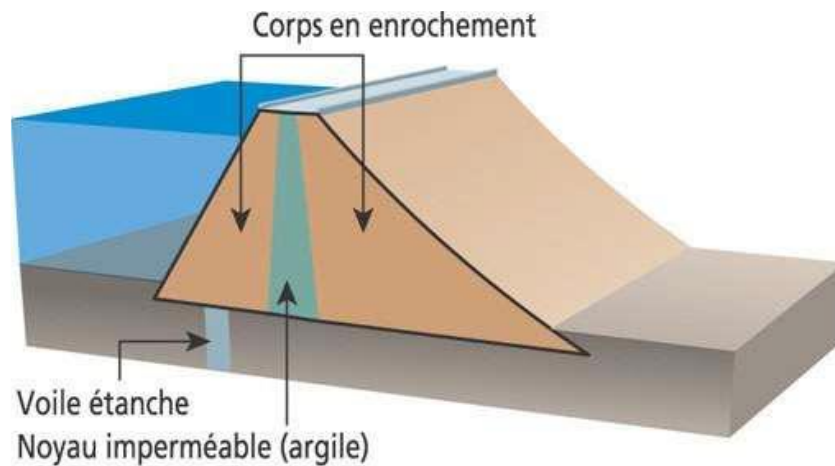


Figure I.6 : Coupe du barrage en enrochements.

I.5.2. Barrages rigides :

Ce sont des barrages constitués en béton, ils sont caractérisés par leur résistance aux efforts. Il existe trois types de barrages en béton :

I.5.2.1 Barrage en béton :

Les barrages en béton (Figure I.7) sont de trois groupes : barrage-poids, Barrages à contreforts et barrages-voûtes.

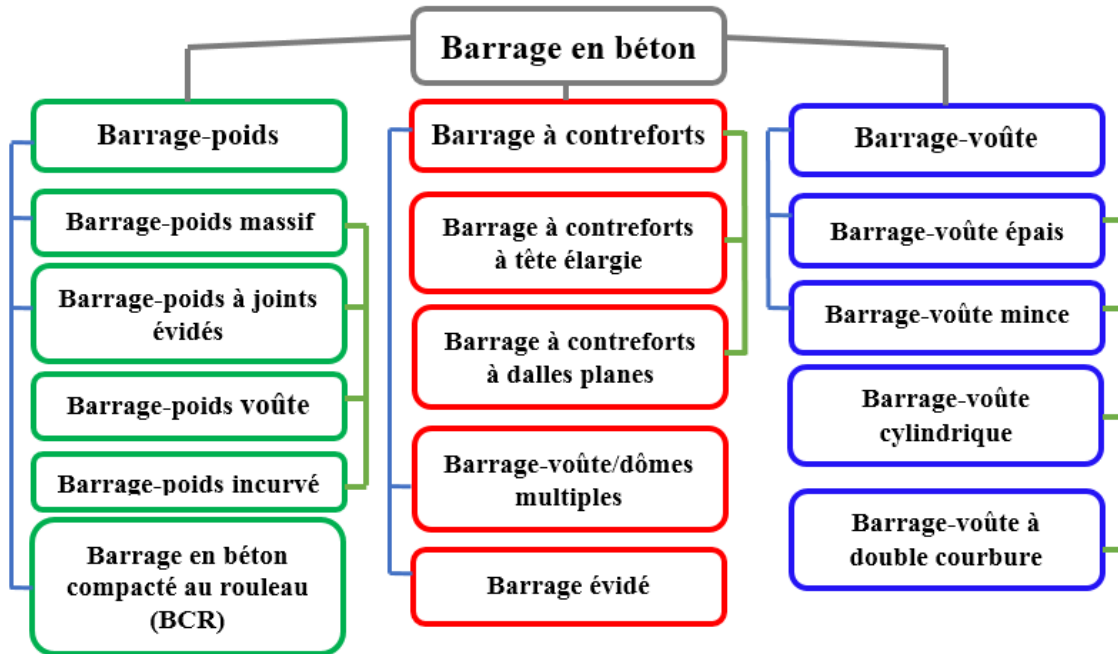


Figure I.7 :Les différents types des barrages en béton. [19].

I.5.2.2. Barrage-poids :

Le barrage-poids est l'un des types les plus anciens et il en existe un grand nombre dans les pays industrialisés [2].

Il est structuré en béton à profil triangulaire, épaissi à sa base et affiné vers le haut (Figure I.8). La stabilité du barrage-poids sous l'effet de la poussée de l'eau est assurée par le poids propre du matériau. Ce type de barrage convient bien pour des vallées larges ayant une fondation rocheuse.

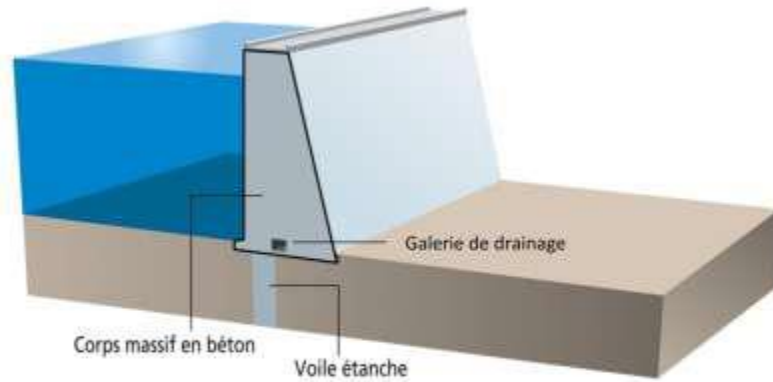


Figure I.8 : Coupe du barrage-poids.

Le barrage poids est un barrage en béton généralement choisi lorsqu'il sollicite peu la résistance des berges. La stabilité de ceux-ci est dépendante de sa propre masse. Sa section transversale est triangulaire afin de fournir une répartition de stabilité. La partie supérieure est rectangulaire pour fournir une largeur de crête adéquate à l'installation et au transport. Sa conception inclut une analyse de stabilité (glissement et renversement), une étude des contraintes, une analyse de la température durant la construction pour éviter une fissuration, et une étude des contre poussées sous le barrage [4].

La figure I.9 représente un exemple de barrage-poids de Béni Haroun à Mila (Algérie).



Figure I.9 : Barrage-poids (Barrage Béni Haroun Mila-Algérie).

I.5.2.2.1 Avantages d'un barrage-poids :

Les avantages du barrage-poids sont : faibles contraintes dans le béton, faibles contraintes transmises par la fondation au rocher.

Les variations de températures ne produisent que de faibles variations de contraintes.

L'évacuateur de crue peut facilement combiner avec le barrage (diriger les crues directement par dessous).

Le gradient des sous-pressions à travers la fondation est faible et les points délicats sont : la résistance mécanique et l'étanchéité [5].

I.5.2.2.2 Inconvénients d'un barrage-poids :

Les inconvénients du barrage-poids sont : les sous-pressions sont importantes dans la fondation, Moyen risque de tassement, Le volume du béton est important (pour le barrage poids évidé, il est plus faible).

Le volume d'excavation de la fouille est important, fragilité au séisme (si les joints entre les blocs ne sont pas faits par injections) et l'échauffement du béton par la prise du ciment est assez problématique [5].

I.5.3 Barrages à contreforts :

Barrages à contreforts sont constitués d'une face en amont continue divisée en sections verticales séparées par des joints de dilatation, dont chaque section étant supportée par un contrefort (Figure I.10).

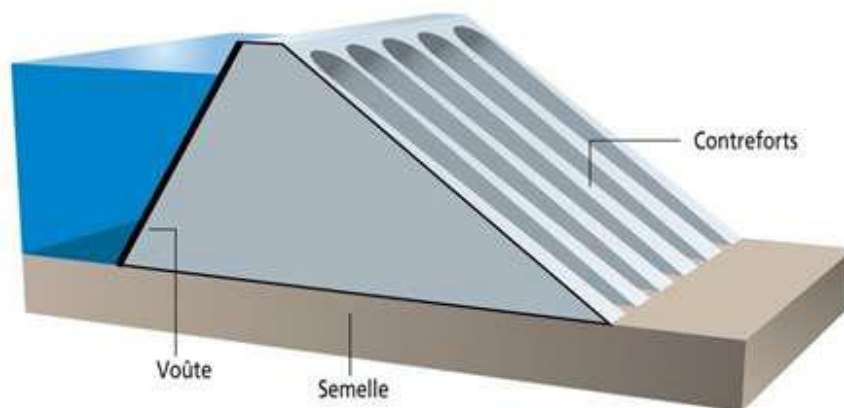


Figure I.10 : Coupe du barrage à contreforts.

Dans des climats froids, la face amont peut être sensible au gel, endommagent le béton. Pour cette raison les barrages à contrefort dans de telles régions sont souvent couverts à l'aval de manière à limiter les effets du climat [6].

Les barrages à contreforts sont des barrages en béton constitués :

- D'une série de murs parallèles, généralement de forme triangulaire, plus ou moins épais et plus ou moins espacés (les contreforts) dans des climats froids, la face amont peut être sensible au gel, endommagent le béton.

Pour cette raison les barrages à contrefort dans de telles régions sont souvent couverts à l'aval de manière à limiter les effets du climat [6].

Les barrages à contreforts sont des barrages en béton constitués :

- D'une série de murs parallèles, généralement de forme triangulaire, plus ou moins épais et plus ou moins espacés (les contreforts).
- Des bouchures entre les contreforts transmettant à ceux-ci la poussée de l'eau. Ils sont bien adaptés aux vallées larges avec une fondation rocheuse de bonne qualité [4].

Les bouchures elles-mêmes peuvent être de plusieurs types :

- D'une dalle plane en béton. Les voûtes sont en béton armé et de très faible épaisseur.
- D'un élargissement du contrefort vers l'amont.
- D'une voûte de faible portée.

La (figure I.11) représente un exemple de barrage à contrefort d'Erra Guéné à Jijel (Algérie).



Figure I.11 : Barrage à contrefort (barrage Erra Guéné Jijel-Algérie).

I.5.3.1 Avantages d'un barrage à contrefort :

Les avantages du barrage contrefort sont : les contraintes transmises par la fondation au rocher sont moyennes.

Les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles.

Le volume du béton est faible.

L'échauffement du béton est faible et les risques de tassements sont moyens [5].

I.5.3.2 Inconvénients d'un barrage à contrefort :

Les inconvénients du barrage contrefort sont : très susceptibles au séisme, la résistance à l'accélération latérale est presque inexistante. La fouille est importante, Le gradient des sous pressions au niveau de la fondation est localement très élevé et les contraintes dues au gradient de température peuvent devenir importante à la tête du contrefort [5].

I.5.4 Barrage-voûte :

Les barrages-voûtes sont des ouvrages remarquables par leurs dimensions, leur finesse. Ils tirent au maximum partie de la capacité de résistance des matériaux et du rocher de fondation. Leur conception est aussi plus complexe que pour les autres types de barrages.

Comme son nom l'indique, un barrage-voûte résiste à la pression de l'eau par l'effet voûte (Figure I.12), c'est-à-dire en s'arc-boutant sur les flancs de la vallée. Son mode de résistance est donc très différent de celui d'un barrage-poids et met en jeu, non plus l'équilibre statique de tranches verticales parallèles, mais l'équilibre élastique de l'ensemble de l'ouvrage. Par contre, il sollicite fortement ses appuis et exige donc un rocher de bonne qualité pour rester dans le domaine élastique. Ce type de barrage est particulièrement adapté aux vallées étroites et profondes et de forme assez régulière. Ils sont notamment utilisés lorsque la largeur de la gorge ne dépasse pas 5 à 6 fois la hauteur du barrage projeté. Pour des largeurs plus importantes des dispositions constructives particulières doivent être adoptées.

C'est le type de barrage le plus achevé en ce sens que c'est celui qui utilise le mieux les matériaux employés. Ses progrès sont allés de pair avec l'amélioration de la qualité des ciments et la maîtrise de la fabrication et de la mise en place des bétons [7].

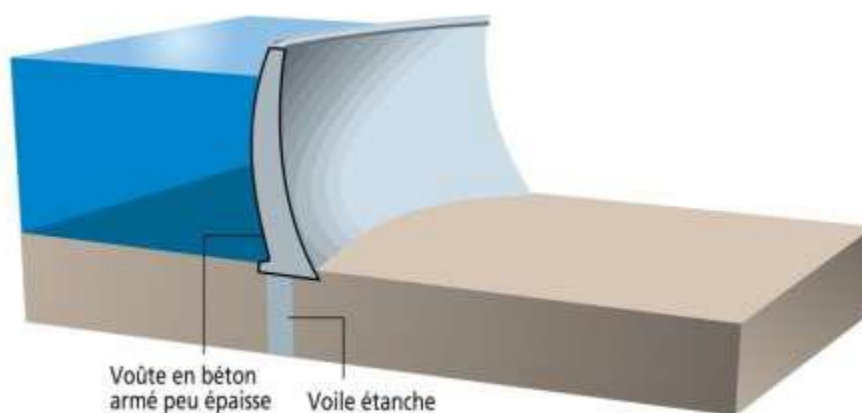


Figure I.12 : Coupe du barrage-voûte.



Figure I.13 :Barrage-voûte (Barrage Tichy Haf Bejaia -Algérie).

I.5.4.1 Avantages d'un barrage voûte :

Les avantages des barrages-voûtes sont : le volume du béton est faible.

La fouille est assez petite.

La résistance au séisme est haute et les sous-pressions au niveau de la fondation sont faibles (la surface de la fondation est petite). [5]

I.5.4.2 Inconvénients d'un barrage voûte :

Les inconvénients des barrages-voûtes sont : les contraintes sont importantes dans le béton et dans le rocher.

Les forces sont transmises obliquement dans les appuis, moyen risque de tassements, l'échauffement du béton par la prise du ciment est à considérer, l'intégration de l'évacuateur de crues (grands débits) dans le barrage est difficile, le gradient des sous pressions au niveau de la fondation est très grand et les sous-pressions dans les fissures du rocher peuvent provoquer des glissements d'appuis [8].

I.6 Fonctions d'un barrage :

I.6.1. Etanchéité :

Elle représente le principal objectif de la construction d'un barrage, d'où il faut assurer :

- L'étanchéité propre du barrage qui est liée à sa constitution.
- L'étanchéité du bassin de retenue qui dépend de la géologie du site, elle s'établit ou se traite lors du choix du site.

- L'étanchéité de la liaison barrage - sol de fondation ; qui doit être contrôlée soigneusement car cette partie est soumise à des fortes pressions [9].

I.6.2. Stabilité :

Un barrage est soumis à différents efforts : les efforts liés à l'action de l'eau (pression hydrostatique sur les parois en contact avec la retenue, pression dynamique exercée par les courants d'eau et pression interstitielle des eaux d'infiltration dans le sol de fondation (sous pression) qui non seulement réduisent les actions de contact du sol sur son support mais réduisent aussi la résistance de ces terrains) et les efforts dus au poids propre du barrage et aux actions de liaison du sol de fondation.

Donc il faut assurer la stabilité de l'ensemble de l'aménagement (barrage et fondation), la stabilité propre du barrage sous l'ensemble des actions extérieurs et la stabilité interne du barrage sous sollicitation [9].

I.6.3 Equipements :

❖ Equipements de sécurité et d'entretien :

Il s'agit de prises d'eau commandées par des vannes et protégées par des grilles permettant d'évacuer rapidement toute ou une partie de la retenue afin d'éviter les dégradations dues à la puissance de l'écoulement.

Evacuateur de crue : c'est un dispositif qui permet de limiter le niveau d'eau dans le barrage lorsque le débit d'alimentation devient trop important.

Vidange de fond : c'est un organe situé au point bas du barrage permettant la vidange pour l'entretien [9].



Figure I.14 : Photographie des équipements de sécurité. [24]

❖ **Equipements de circulation :**

Les barrages sont équipés de galeries permettant l'accès aux équipements hydrauliques et électriques et permettant l'auscultation et le contrôle du barrage, des canaux pour la navigation fluviale, passes à poissons pour favoriser la circulation des poissons migrateurs.

Il est très fréquent que la crête du barrage soit utilisée comme voie de circulation, donc elle doit être équipée d'une chaussée et des dispositifs usuels de sécurité.

❖ **Equipements hydroélectriques :**

Les équipements hydroélectriques sont décomposés en trois parties :

- une partie concernant la circulation de l'eau.
- une partie de transformation d'énergie (turbine, alternateur).
- une partie électrique concernant la transformation et le transport de l'électricité.

Les conduites forcées doivent être très résistantes avec des parois très lisses pour limiter les pertes de charge et les cavitations. L'ensemble des équipements hydrauliques est équipé de vannes et de dispositifs de régulation des pressions et des débits [10].

I.7 Matériaux de construction :

On distingue deux types fondamentaux de matériaux

- Barrages rigides : en béton conventionnel vibré BCV ou en béton compacté au rouleau BCR, ou en maçonneries,
- Barrages souples : en terre étanche ou en enrochement avec une résistance au cisaillement acceptable [11].

I.8 Choix du site du type de barrage :

Plusieurs éléments sont importants dans le choix d'un site de construction et le choix du profil des barrages : - Les conditions topographiques - Morphologie de la vallée considérée - Donnée géologiques et géotechniques - Donnée sismologique - Les Conditions climatiques - Crues et ouvrages hydrauliques - Critères économiques [11].

I.8.1 Conditions topographiques :

Constitue le support essentiel du travail du géologue qui doit toujours situer plus au moins précisément les observations qu'il réalise selon le degré d'avancement des études et l'importance des problèmes, on peut distinguer la topographie simplifiée au nivellement des premiers sondages réalisés sans attendre les levés détaillés. Et aussi la topographie régulière qui nécessite la réalisation de plans topographiques précis s'appuyant sur des levés de la zone d'implantation du barrage [12].

I.8.2 Morphologie de la vallée considérée :

Tout barrage est nécessairement lié à son environnement. La morphologie de la vallée joue un rôle important dans le choix du site du barrage et du type d'ouvrage le mieux adapté. L'emplacement idéal et le plus économique est celui d'un site étroit, précédé à l'amont par un élargissement de la vallée, à condition que les appuis des barrages soient sains. Ce type de site est peu fréquent soit parce qu'il n'existe pas toujours de resserrement des vallées dans la nature, soit parce que le choix du site n'obéit pas toujours aux seules considérations techniques. Un site étroit conviendra aussi à un barrage poids [12].

I.8.3 Données géologiques et géotechniques :

La constitution même d'une retenue d'eau requiert du massif dans lequel elle est située des propriétés minimales en matière d'étanchéité naturelle. Il serait en effet très coûteux de généraliser l'étanchement artificiel à tout le fond du bassin, et de telles réalisations sont exceptionnelles.

Par ailleurs, chaque type de barrage requiert des propriétés mécaniques minimales spécifiques en matière de déformabilité et de résistance des appuis, lorsque ceux-ci sont soumis :

- Aux forces appliquées directement par le barrage.
- Aux forces internes induites par la percolation de l'eau au sein de la fondation [20].

Tout projet de barrage commence donc par une étude géologique, géophysique et géotechnique qui est progressivement affinée au fur et à mesure que le projet se développe et que les choix se précisent sur le type et la hauteur du barrage. Le géologue intervient en premier lieu pour expliquer la nature et la structure du site, mettre en évidence les principales incertitudes ; les reconnaissances géotechniques par sondages, galeries de reconnaissances, prélèvements, essais de laboratoire et essais in situ sont réalisées pour lever les inconnues.

Au droit d'un site de barrage on peut trouver plusieurs types de sols :

- Roche saine, pouvant présenter une surface partiellement altérée ou plus ou moins masquée par des dépôts superficiels qui seront éliminés avant la construction.
- Le rocher peut être aussi recouvert par un terrain meuble d'épaisseur plus ou moins importante.
- Les vases et les tourbes sont inaptes à supporter des ouvrages sauf les petits ouvrages en tenant compte de certaines précautions d'usage [2].

On classe les fondations selon la qualité du rocher (Module de déformation) qui oriente, à priori, le profil type des barrages.

Tableau I.1 : Choix du type du barrage en fonction de la géologie de la vallée [13].

Type du Rocher	Module d'élasticité E (MPa)	Considération
Bonne Qualité	> 8 000	Tous types de barrages sont possibles.
Moyenne Qualité	4 000 à 8 000	Tous types de barrages sauf barrage voûtent.
Mauvaise Qualité	< 4 000	Barrage en remblais

I.8.4 Matériaux utilisés :

Le choix de site de barrage nécessite l'utilisation des grandes quantités de matériaux. Le coût du barrage dépend fortement du prélèvement, du transport, et de la mise en place des matériaux.

Les zones d'emprunt doivent être à proximité immédiates du site et de quantité nécessaire, et les frais de traitement des matériaux doivent être optimisés (concassage, lavage, et sélection). La disponibilité sur le site ou à proximité de matériaux utilisables pour la construction d'un barrage à une incidence prépondérante sur le choix du type de barrage :

- Sol utilisable en remblai.
- Enrochement pour remblai ou protection de talus (ripe-rap).
- Agrégats à béton (matériaux alluvionnaires, ou concassés).
- Liant (ciment, cendres volantes)

La possibilité d'extraire ces matériaux de l'emprise de la retenue permet d'accroître la capacité de stockage. En outre cela minimise généralement les coûts de transport et de remise en état des zones d'emprunts, si l'on ne dispose que de l'enrochement.

La solution béton, en particulier la solution B.C.R peut également s'avérer compétitive sous réserve de fondation suffisamment bonne (rocher ou terrain compacte), ne nécessitant pas des fouilles excessives [11].

I.8.5 Risque sismique :

L'étude sur une base du comportement dynamique du barrage sous l'effet d'une charge sismique, l'aléa sismique fait apparaître principalement deux niveaux de séismes à prendre en compte :

- MCE [maximum credible earthquake) correspondant au séisme maximal qui peut être envisagé sur un site.
- DBE (design basis earthquake) est un niveau de séisme pour lequel on souhaite protéger l'ouvrage de manière que son utilisation ne soit pas compromise. Le séisme de référence est généralement défini par les paramètres macrosismiques suivants : Intensité épacentrale, profondeur focale, distance épacentrale, sismicité induite par le site [12].

I.8.6 Conditions climatiques :

Les conditions climatiques influents de manière prépondérante les conditions d'exécution de l'ouvrage et par-là le délai d'exécution, notamment dans le cas des barrages en terre, et influe aussi sur la durabilité de l'ouvrage (barrage en béton). A titre d'exemple : la différence de température du parement amont en contact avec l'eau qui est froide, et la partie supérieure qui est exposée au rayonnement solaire fait apparaître des gradients thermiques importants peuvent conduire à la fissuration du béton. Aussi, et pour des raisons liées au compactage des sols fins, les conditions de pluviométrie peuvent induire des conséquences sur la réalisation [14].

I.8.7 Crues et ouvrages hydrauliques :

Le coût des ouvrages d'évacuation des crues dépend des caractéristiques hydrologiques du bassin versant.

Dans le cas des bassins versants étendus et de crue prévisible sévère, il peut être intéressant de combiner évacuateur de crue et barrage dans un ouvrage en béton déversant. Lorsqu'une galerie est requise pour assurer la dérivation provisoire du cours d'eau durant les travaux, cette galerie peut-être avantageusement intégrée aux ouvrages d'évacuation des crues, moyennant si besoin, une légère augmentation de sa section [12].

I.8.8 Critères économiques :

Dans plusieurs cas, les considérations précédentes auront permis de retenir plusieurs types de barrage. Par exemple, des fondations rocheuses, la présence de matériaux meubles proches du site, un débit de crue important, conduiront à mettre en balance un barrage en BCR et un barrage en terre équipé d'un évacuateur de crue coûteux. Il convient alors de poursuivre les études pour les deux types d'ouvrages, en veillant à affiner les estimations de coût au fur et à mesure de la progression des études. Dès que l'un des types de barrages paraît significativement plus économique, il est préférable de ne pas s'entêter sur l'autre option [15].

I.9 Rupture des barrages en terre :

Le risque « rupture de barrage » entre dans la catégorie des risques technologiques. Les causes ainsi que les mécanismes en jeu lors d'une rupture sont variables en fonction des caractéristiques propres au barrage. de construction rendent les barrages modernes beaucoup plus sûrs [16].

I.9.1 Causes de rupture des barrages en terre :

I.9.1.1 Problèmes techniques :

Les problèmes techniques peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. Il peut s'agir d'un défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des crues ou bien d'un vice de conception, de construction ou de matériaux, le type de barrage, les matériaux utilisés, la nature des fondations ainsi que l'âge de l'ouvrage vont avoir une influence sur l'apparition de ces problèmes [16].

I.9.1.2 Causes naturelles :

Quel que soit le type des actions ou des sollicitations sur un barrage, elles menacent son sécurité et son stabilité et par la suite on aura un grand risque, on cite ici : **[17]**

1. Le phénomène de renard au niveau du contact fondations-barrage ou fondation-ouvrages annexes.
2. Glissement des talus du barrage.
3. Liquéfaction du remblai par un séisme.
4. Risque de tassement.

I.9.1.3 Causes humaines :

Les causes humaines peuvent enfin être à l'origine d'accidents : études préalables pas assez approfondies, contrôle d'exécution insuffisant, erreurs d'exploitation, défaut de surveillance et d'entretien ou encore actes de malveillance, sabotage, attentat, guerre **[16]**.

I.9.2 Types de ruptures :

On classe les types de ruptures en trois familles **[1]**.

- **La rupture au premier remplissage** : représente 37%, elle prend beaucoup de temps selon la capacité du barrage.
- **La rupture par déversement** :(submersion) représente 37%, cette cause a diminué pour les barrages récents.
- **La rupture pendant l'exploitation** : représentée 26%, la cause de cette rupture c'est le manque ou l'insuffisance d'entretien et de surveillance, on remarque que cette rupture touche beaucoup plus les barrages en remblai **[17]**.

Conclusion :

En conclusion, le barrage reste un ouvrage très important et nécessite une conception très précisée car sa rupture peut causer des conséquences catastrophiques humaines et économiques.

La conception des barrages, tâche difficile et compliquée, intègre de nombreux paramètres et divers critères, aussi bien techniques qu'économiques et il est souvent délicat de retrouver un compromis sécurité-économie. La géologie du site, les paramètres hydrologiques, la qualité des matériaux, le risque sismique restent les aspects les plus décisifs pour une conception rationnelle.

Chapitre II: Les systèmes d'auscultation

II.1. Introduction :

L'auscultation est la garantie de la sécurité et de la longévité de nos barrages, un examen minutieux et approfondi du comportement mécanique et hydraulique d'un barrage et de ces ouvrages annexes [25].

Assurer la sécurité d'un barrage est primordial. La surveillance des barrages et ces organes annexes, nécessite un système d'exploitation particulier, dont le processus inclus trois types d'actions :

1. Les inspections visuelles ;
2. Les vérifications et essais des organes d'exploitation et de sécurité ;
3. L'auscultation de l'ouvrage : du barrage en lui-même, mais aussi de sa fondation, de ses organes et de son environnement immédiat ; à l'aide de moyens topographiques ou d'instruments de mesure.

Ces activités sont complémentaires, et doivent être planifiées et coordonnées. Leur contenu doit être défini et justifié afin de couvrir au mieux les évolutions comportementales dues au vieillissement de l'ouvrage. Le processus de surveillance doit évoluer dans le temps en fonction des résultats d'analyse des données collectées. Le système d'auscultation doit être complété par les inspections visuelles et les tests des organes hydromécaniques[26].

II.2. Surveillance et auscultation :

II.2.1. Généralités :

Chaque barrage constitue un ouvrage de génie civil unique dès sa construction, par ce que sa conception et son dimensionnement sont complètement conditionnés par les caractéristiques mécaniques et hydrogéologiques du site sur lequel il est érigé. Par la suite, tout au long de sa vie, l'ouvrage au sens large (le barrage et l'ensemble du massif de fondation) va évoluer sous l'effet de l'action de l'homme: exploitation du barrage (saisonnalité de son remplissage, vidanges, opérations de maintenance, modifications du réseau de drainage, etc.), mais également de facteurs environnementaux tels que des événements météorologiques particuliers (crues, sécheresse, canicule, grands froids) ou climatiques (réchauffement). Des évolutions des propriétés mécaniques des matériaux (béton et rocher de fondation) liées au vieillissement ou à des pathologies particulières (alcali-réaction, fissuration) sont également à prendre en compte. Les sollicitations impactant le barrage sont donc multiples, variées en termes de fréquence et d'amplitude, et il est impossible de toutes les décrire, encore moins de les prévoir, à chaque instant et en tout point de l'ouvrage. L'ensemble de ces sollicitations, additionné à la part d'incertitude relative à l'état initial de l'ouvrage, va produire sur la structure des évolutions dont la complexité rend impossible une définition déterministe. Malgré tout, la description du comportement des ouvrages hydrauliques dans un objectif d'évaluation de leur état de sûreté est indispensable et même réglementaire. Le moyen de pallier cette incertitude relative à la fois aux sollicitations et à l'ouvrage lui-même, repose donc sur un suivi permanent, qui fait appel à un programme de surveillance systématique et continue[27].

II.2.2. Objectifs de la surveillance :

La surveillance commence dès la construction, et concerne à la fois l'ouvrage principal et les ouvrages secondaires (chenal de dérivation, digue secondaire, etc...). La phase cruciale de mise en eau fait l'objet d'une surveillance intense, puisque c'est la première fois que l'ouvrage est soumis à sa charge de service. La surveillance lors de la mise en eau a pour but de vérifier le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, et permet de valider certaines hypothèses de calculs et résultats de calculs[28].

Une fois l'ouvrage en exploitation, l'objectif principal de la surveillance est de fournir l'ensemble des informations qualitatives et quantitatives qui vont permettre au maître d'ouvrage d'assurer la sûreté de l'ouvrage, et d'en maîtriser les coûts d'exploitation. Elle vise à déceler tout signe avant-coureur de changement de comportement de l'ouvrage, en suivant d'une part les évolutions lentes liées au vieillissement (Sont-elles conformes aux prévisions ? Qu'impliquent-elles en termes de stabilité dans le temps du comportement de l'ouvrage ?), et d'autre part l'apparition de phénomènes nouveaux qui pourraient être représentatifs d'un comportement anormal. Effectivement, le demi-siècle d'expérience internationale en termes de surveillance d'ouvrages, a permis de montrer qu'en dehors d'événements exceptionnels (crues, séisme), la rupture d'un ouvrage en exploitation est toujours précédée de signes précurseurs qui traduisent la détérioration de l'ouvrage[29].

II.3. Auscultation des barrages :

L'auscultation ou la surveillance du barrage s'effectue aussi bien pendant la période de mise en eau qu'au cours de la période d'exploitation. Elle s'appuie sur de fréquentes inspections visuelles et des mesures effectuées sur le barrage et ses appuis (mesures de déplacement, de fissuration, de tassement, de pression d'eau et de débit de fuite, ...). A cet effet, un dispositif d'auscultation est installé, adapté à la taille de l'ouvrage et aux risques qu'il présente[30].

Toutes les informations recueillies par la surveillance permettent une analyse et une synthèse rendant compte de l'état du barrage, ainsi que l'établissement, tout au long de son existence, d'un «diagnostic de santé»[30].

II.3.1. L'inspection visuelle :

Elle permet d'obtenir une vision d'ensemble et de détecter le changement survenu depuis le dernier contrôle (formation des fissurations, infiltration des eaux, écaillage du béton...etc.). On distingue trois niveaux dans l'inspection visuelle :

- **Inspection visuelle de routine** : qui a pour objectif de détecter rapidement tout phénomène nouveau affectant le barrage et suivre quantitativement l'évolution de ces phénomènes tels que : le changement du niveau de la retenue, apparition des zones humides dans le parement et le pied aval du barrage, apparition et évolution des fuites, obstruction des vannes par des corps flottants ou bien

du coursier de l'évacuateur de crue par la végétation ou par les éboulements. Ainsi que la vérification de l'état des appareils d'auscultation s'ils existent[9].

- **Inspection visuelle à l'occasion de crue** : lors de crue le barrage est soumis aux sollicitations les plus sévères (cote du plan d'eau élevée, débit important sur les déversoirs, vagues...etc.L'inspection à ce niveau est riche en informations (niveau maximum atteint par l'eau, durée de la crue, corps flottant et vagues...etc.) après la crue il faut vérifier : l'état des déversoirs et des parements du barrage, apparition ou l'augmentation des fuites si elles existent ...etc [9].

- **Visite technique approfondie** : la visite est effectuée par un ingénieur spécialiste ; chargé par le propriétaire ; du suivi du barrage. La périodicité recommandée de cette visite dépend de l'importance du barrage [31].

II.3.2.L'auscultation instrumentale :

Elle se réalise en utilisant des instruments classiques (manuels) ou automatisés et centralisés à distance. La lecture classique à l'avantage d'obliger le personnel d'exploitation à se rendre sur le site et inspecter le barrage en détail, elle est parfois conditionnée et la qualité de l'auscultation dépend de la précision des observations. La lecture électronique centralisée facilite la tâche de l'inspection, mais elle présente parfois des incertitudes liées à la fiabilité de l'appareil et ou du système de transmission [32].

II.4. Choix des profils d'auscultation :

Il est matériellement impossible de suivre, en tout point, de la structure et de sa fondation, tous les paramètres physiques à tout instant. Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu de manière à ne suivre que les paramètres significatifs du comportement en un nombre limité de points et selon des périodicités fixées à l'avance [33].

Le choix de l'emplacement des profils d'auscultation peut être motivé par les raisons suivantes :

- Les sections caractérisées par une hauteur importante du barrage et dont la fondation immédiate est relativement imperméable.

Ceci peut générer d'importants excès de pression interstitielle à la base du barrage.

- Les sections caractérisées par la plus grande hauteur du barrage et peut donc accumuler les plus fortes déformations.

- Les sections caractérisées par une hauteur importante du barrage ainsi que par sa proximité d'un ancrage de génie civil (galerie de dérivation par exemple).

- Les sections caractérisées par interception d'une faille dont le comportement doit être suivi [34].

II.5. Choix du dispositif d'auscultation :

Le problème est de définir les types d'appareillage et leur implantation apportant une garantie satisfaisante pour atteindre cet objectif. En raison de la spécificité de chaque barrage, les dispositifs d'auscultation sont à étudier au cas par cas, le projecteur peut cependant s'appuyer sur quelques principes et sur le retour d'expérience des ouvrages en service [35].

La définition du dispositif d'auscultation sera établit par un expert, après une visite détaillée de l'ouvrage, une analyse de son comportement, des risques encourus et des travaux de confortement envisagés à plus ou moins long terme [36].

II.6. Types d'auscultation :

L'auscultation est basée sur la mesure de paramètres physiques et le suivi de leur évolution, les mesures physiques sont réalisées sur l'ouvrage, ses fondations, ou son environnement (bassin versant par exemple).

L'auscultation permet de mesurer :

- Le comportement hydraulique (débits, pressions),
- Le comportement mécanique (déplacement, déformations).

On peut distinguer deux types d'auscultation, réalisées à des fréquences et par des intervenants différents :

- **Auscultation générale** : au moyen d'équipements fixes installés dans le barrage ou d'appareils de mesure mobiles. Elle est réalisée à des fréquences de l'ordre de la semaine ;
- **Auscultation topographique** : (topométrie, nivellement, etc.) nécessitant des points de repères fixes. Sa fréquence est généralement annuelle.

Par ailleurs, l'auscultation peut viser deux objectifs différents :

- **Auscultation à court terme** : permet de détecter des évolutions à court terme du comportement ou de l'état de l'ouvrage et de mettre en œuvre des mesures appropriées en cas de dérive dangereuse.
- **Auscultation à long terme** : vise à détecter les évolutions lentes de l'état de l'ouvrage en vue de maintenir la sécurité dans le temps et éventuellement d'initier des analyses approfondies et des travaux de confortement [26].

II.7. Principe du fonctionnement du système d'auscultation :

L'auscultation sert à surveiller le comportement du barrage et à détecter toute anomalie qui peut être produite dans cet ouvrage. Le réseau d'auscultation sert à mesurer plusieurs paramètres (pression, niveau, débit, déformation de l'ouvrage...). Après l'acquisition de toutes les données, il faut les traiter et les analyser pour évaluer la sécurité du barrage et prévoir les risques qui menacent l'ouvrage et les biens et la population en aval de l'ouvrage et prendre d'autres mesures de sécurité si la situation de l'ouvrage est critique [37].

II.8. Présentation des instruments de mesure des déformations :

II.8.1 Topographie :

Ce procédé permet d'obtenir les déplacements planimétriques et altimétriques que subit le barrage. Il consiste à mettre en place un réseau de points homogène couvrant toute la zone d'étude et dont les coordonnées sont déterminées avec une grande précision à l'aide des techniques de positionnement terrestres ou spatiales (nivellement de précision, polygonaion, positionnement par GNSS ...)

(Figure 14). La réitération des observations du même réseau, après certain temps, permet de déceler les mouvements apparus pendant cette période. Autrement dit, il s'agit de comparer les données à différentes époques sur le réseau pour déduire les déformations subies par ce réseau au cours du temps [38].



Figure .II.1. Auscultation topographique.

II.8.1.1. Tassomètre :

Ils permettent d'évaluer les déplacements axiaux d'une série de points scellés dans le terrain le long d'un forage (Figure 15). Ce système est adapté pour l'évaluation des tassements, des déformations et des gonflements des sols [19].



Figure .II.2. Cellule de tassement à boule.

II.8.1.2. L'inclinomètre :

Il s'agit d'un appareil constitué d'une sonde équipée de roulettes (Figure 16) qui mesure l'inclinaison d'un tube-guide scellé dans un terrain ou un ouvrage (Figure 17). L'inclinaison du tube-guide est mesurée

en des points régulièrement espacés. Les variations des inclinaisons dans le temps permettent de calculer les : déplacements horizontaux relatifs des différents points du tube[37].



Figure.II.3. Sonde inclinométrique digital



Figure.II.4 : Image d'un tube inclinométrique.

Il existe trois types :

Le niveau hydrostatique, l'inclinaison est mesurée selon le niveau d'eau.

- Le niveau hydrostatique électronique, la bulle d'air se déplace en fonction de l'inclinaison ce qui entraîne une diminution de la résistance entre l'électrode central et une électrode latérale.
- Surface de liquide avec mesure optique de l'inclinaison, l'horizon artificiel d'un liquide sert de plan de référence. Selon la pente, l'angle entre le capteur lumineux et l'horizon varie, l'angle est mesuré électro-optiquement [48].

II.8.2.Piézométrie :

Observée soit par des piézomètres, soit par des cellules de pression interstitielle. Un dispositif idéal comprend, équipé de piézomètres pour détecter l'apparition d'une zone de fuite. Si le barrage est doté d'un système de drainage des fondations, il convient d'en contrôler l'efficacité par des cellules ou des piézomètres.

Disposés de part et d'autre du système de drainage [47].



Figure.II.5. Piézomètre.

II.8.3. Température :

Capteurs distribués de température à fibres optiques : Une fibre optique (à base de silice) protégée à l'intérieur d'un câble est installée suivant un parcours défini. A l'aide d'un instrument de mesure (analyseur), des impulsions de lumière sont envoyées dans la fibre [39].

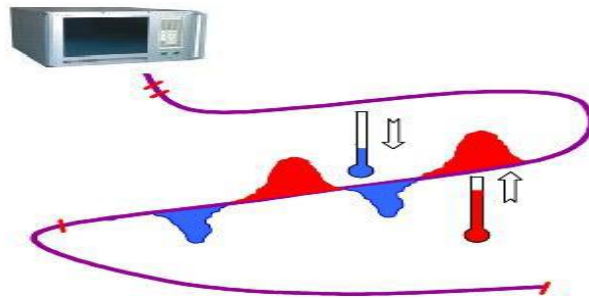


Figure.II.6. Capteur de température à fibre optique

II.8.4. Fissuromètre Vinchon :

Le Vinchon est constitué de deux pièces en inox peintes dans lesquelles sont insérées dans trois axes trois couples de touches de mesures. L'avantage de cet instrument c'est qu'il permet le suivi de l'évolution relative de l'écartement ou du raccourcissement d'une fissure sur lequel sont scellées de part et d'autre ces deux pièces antagonistes [37].

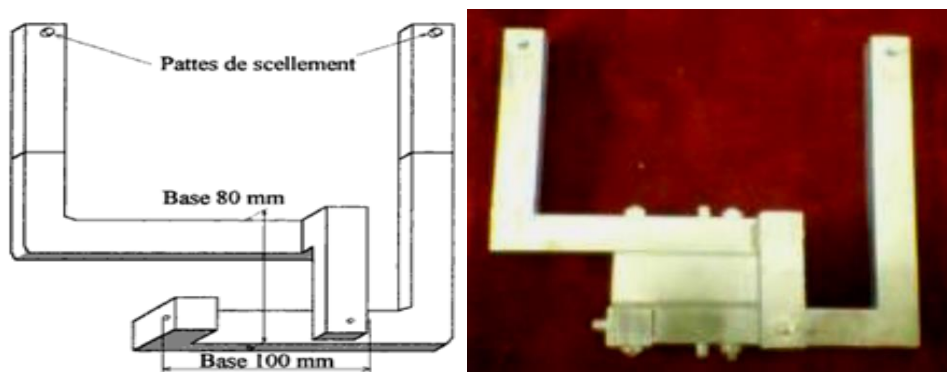


Figure.II.7. Vinchon

II.8.5. Contraintes :

Le dispositif de mesure de contraintes se présente sous forme d'un disque plat et circulaire pour la mesure perpendiculaire à la surface de la pression. Différents systèmes de transmission des valeurs sont utilisés (électrique, hydraulique, pneumatique) pour déterminer la pression effective (pression des terres et pression interstitielle), Il est nécessaire d'installer une cellule de mesure de pression interstitielle.

II.8.6. Pendule :

Le pendule permet la mesure précise de déplacements horizontaux. Il est essentiellement constitué par un fil suspendu qui est centré avec précision et tendu par un poids. En vue de permettre l'amortissement

D'une oscillation éventuelle du pendule, le poids tendeur du fil se trouve dans une cuve remplie d'huile [9].

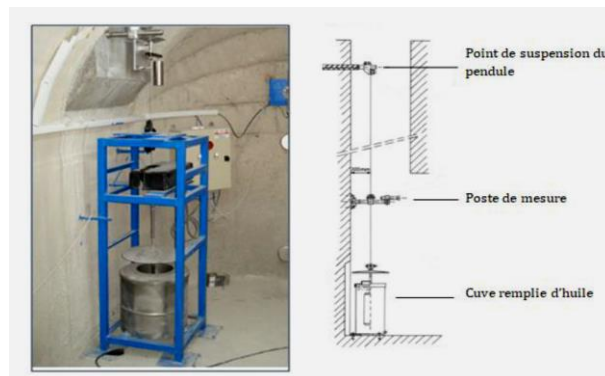


Figure.II.8. Pendule direct.[48]

II.8.7. Manomètre :

Le manomètre est un instrument de mesure de la pression d'un fluide (air, huile, eau). Il est à noter que celle-ci ne peut être mesurée que par rapport à une pression de référence, en général la pression atmosphérique. Il existe de nombreuses variantes de manomètres par exemple les manomètres hydrostatiques, les manomètres anéroïdes [37].



Figure.II.9. Exemple d'un manomètre.

Le tableau II.2 : donnent les principaux paramètres qui doivent être relevés pour le barrage en béton

Tableau II.2 : Instruments et moyens de mesure pour les barrages en béton[47].

Type de mesure	Instruments et moyens de mesure
Déformation de la structure	<ul style="list-style-type: none"> - Pendule direct - Pendule inverse - Alignement par fil - Extensomètre - Réseau extérieur (Nivellement, Polygone, Mesures d'angle Mesures de vecteur, Alignement)
Mouvements particuliers (fissures, joints)	<ul style="list-style-type: none"> - Fissuromètres - Vinchon
Températures dans le corps du barrage	<ul style="list-style-type: none"> - Thermomètre - Thermomètre électrique
Sous –pressions au contact béton –fondation	<ul style="list-style-type: none"> - Relevé de niveau par câble à témoins - Manomètre - Piézomètre - Cellule de pression hydraulique ou électrique
Débits de percolation et de drainage	<ul style="list-style-type: none"> - Déversoir - Mesure volumique - Venturi
Chimie des eaux de fuite	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse au laboratoire

II.9. Différentes méthodes d'analyse des mesures d'auscultation du barrage :

II.9.1. Le modèle HST :

Les méthodes statistiques de type Hydrostatique Saison Temps (également appelées Hydrostatic-Season-Time ou HST) ont été proposées en 1960 pour analyser les mesures de déplacements issues des pendules des barrages voûtes (Ferry et Willm, 1958 ; Willm et Beaujoint, 1967 ; Lugiez et al,(1970). Ces méthodes sont actuellement utilisées dans plusieurs pays. L'expérience acquise depuis quelques décennies sur plusieurs centaines de barrages a confirmé l'excellence de l'approche comme un outil puissant d'interprétation des mesures d'auscultation.

La littérature ne fait toutefois pas état d'une méthode opérationnelle tenant compte des effets différés (écoulement dans un milieu poreux), qui permettrait d'analyser les mesures hydrauliques, influencées par le niveau de la retenue et par la pluie [40]. L'application de la méthode HST est très répandue elle est très présente dans la littérature [41].

Dans le modèle, les facteurs explicatifs pris en compte sont au nombre de trois effets :

- Le niveau du plan d'eau, effet hydrostatique, noté « H » et représenté par une fonction polynomiale de la cote ;
- La date dans l'année, utilisée pour l'effet saisonnier de la variation de température, noté « S » et représenté par des fonctions sinusoïdales ;
- Le temps, utilisé pour l'effet du vieillissement, noté « T » et représenté par la somme d'un terme linéaire, d'une exponentielle négative et parfois d'une exponentielle positive.

II.9.2. La méthode d'analyse ACP :

L'ACP cherche les liens entre 35 plusieurs variables, en chiffrant leurs corrélations avec les composantes principales de l'échantillon (qui ne sont autres que les vecteurs propres). L'application de l'ACP à l'analyse est multiple. Elle est souvent utilisée pour des regroupements objectifs de points de mesures, fortement corrélés entre eux, et dont le comportement obéit donc à une même loi. C'est le cas par exemple du déplacement en crête des voûtes. Appliqués à un ensemble de piézomètres, ou à des points de fuite, la méthode permet de distinguer par exemple ceux des piézomètres qui sont influencés par le réservoir, et ceux qui ne le sont pas, etc. C'est ainsi que l'on sélectionne certains points de mesure

représentatifs de l'ensemble d'un échantillon. Une autre application de l'ACP est la recherche de mesures anormales par la méthode des résidus : celle-ci consiste à soustraire à une variable une combinaison linéaire des composantes principales, mettant en évidence de manière très efficace les écarts ponctuels d'une mesure, par rapport à la tendance générale de l'échantillon. Citons l'application de cette analyse par Chouinard et al. (2006) qui l'a appliqué pour analyser les mesures d'auscultation du barrage de Daniel Johnson (Quebec) un barrage à voûtes multiples [39].

II.9.3. Méthodes déterministes :

Cette méthode est une méthode numérique de résolution des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie. Elle connaît, depuis 1970 environ, une extension fantastique, qui va de pair avec le développement et l'accroissement de la puissance des micros ordinateurs. Elle est devenue un outil de travail, de calcul et de conception de l'ingénieur dans des domaines aussi variés que l'analyse des structures [42].

La méthode des éléments ou des volumes finis met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

- La mécanique de structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité,....etc.
- L'analyse numérique : méthodes d'approximation, résolution des systèmes linéaires,....etc.
- L'informatique appliquée : techniques de développement et de la maintenance de grands logiciels.

La méthode des éléments finis (MEF) est souvent utilisée dans la conception des barrages en remblai. Avec les analyses qui utilisent cette méthode, on détermine les déplacements, les déformations et les contraintes dans une structure soumise à différentes conditions de chargement et de frontières. Les différences entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées peuvent être causées par le choix de paramètres géotechnique (mécaniques) et/ou de conditions de chargement et de frontières non adéquats dans la modélisation par éléments finis [43].

II.9.4. Méthodes hybrides :

Les modèles dits hybrides, parfois dénommés modèles déterministes spéciaux combinent les propriétés de base des modèles déterministes et statistiques. Les dérivées de la

modélisation des relations fonctionnelles du système de réservoir (comme décrit dans la section sur les modèles déterministes) peuvent être utilisées comme une capacité de prévision. Ils sont complétés par des coefficients d'étalonnage. Un modèle hybride peut donc être décrit comme un modèle déterministe avec un ajustement statistique des paramètres, ou comme un modèle statistique avec des fonctions d'influence, qui ont été dérivées de la modélisation physique du barrage[45].

II.9.5. La méthode d'analyse des données d'auscultation par réseau de neurones :

Un réseau de neurones se compose de plusieurs neurones interconnectés entre eux. Les neurones sont répartis sur des couches, en général trois (figure 24). Pour comprendre le fonctionnement du réseau de neurones il faut d'abord s'intéresser au fonctionnement d'un unique neurone. Chaque neurone fonctionne de la même manière (figure 23). Sur les schémas neuronaux, les entrées sont à gauche et la sortie (unique) est à droite. S'il y a plusieurs branches en sortie d'un neurone, c'est la même valeur numérique qui est copiée dans chacune des branches. A partir des valeurs numériques en entrée, le neurone fait dans un premier temps une combinaison linéaire des entrées. Les coefficients de la combinaison linéaire sont appelés poids [46].

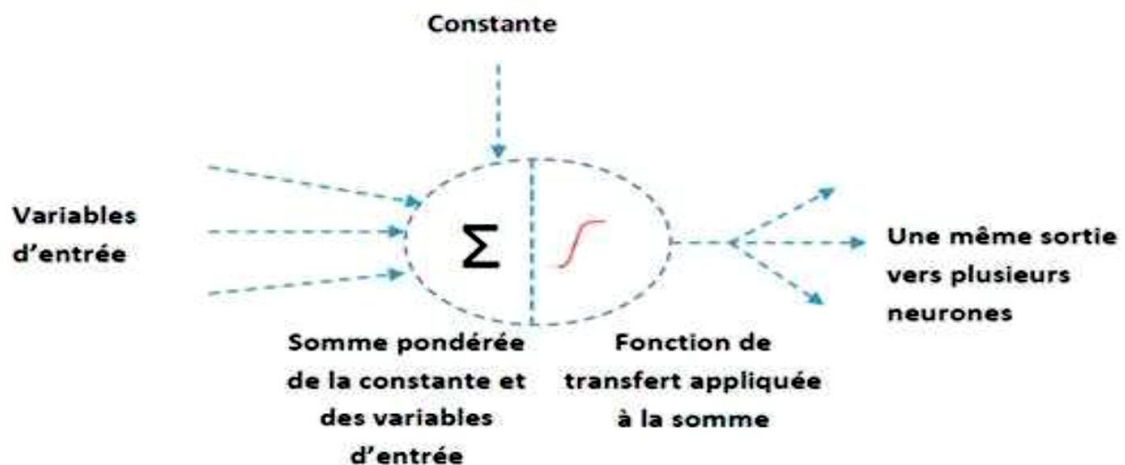


Figure.II.10. Fonctionnement d'un neurone.

Le réseau de neurones à trois couches utilisé, une couche d'entrée, une couche cachée et d'un neurone de sortie. Chaque neurone de la première couche a pour variables d'entrée toutes les variables explicatives du modèle (cote, saison, temps, pluie, neige, déplacement...). De même, chaque neurone de la deuxième couche reçoit la sortie de tous les neurones

précédents. Enfin, le neurone de sortie fait la somme pondérée du résultat des neurones de la couche cachée et obtient la prévision du modèle[46].

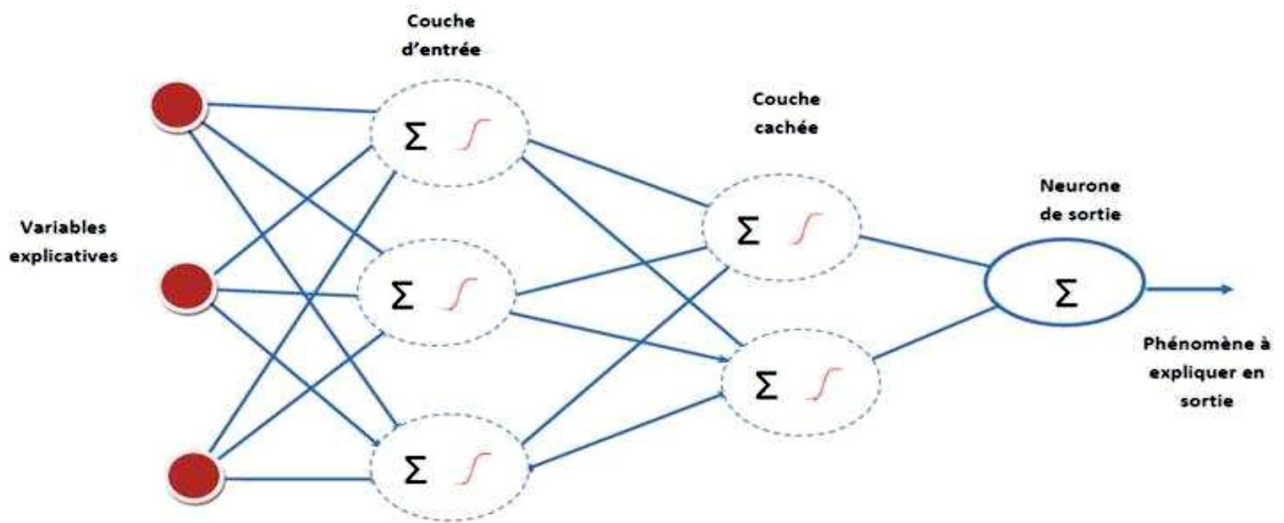


Figure.II.11. Réseau de neurones à trois couches (entrée, cachée et de sortie) [46].

Conclusion :

L'auscultation est un moyen de surveillance des barrages, il existe deux types de systèmes d'auscultation : automatique et manuelle. Nous avons présentés le système d'auscultation installé au barrage qui est de type manuel dont nous avons exposés ces différentes stations de mesures ainsi que ces instruments de mesure et la méthode suivi par l'opérateur pour l'acquisition des données délivrées par ces instruments.

Les analyses des données de surveillance des barrages sont principalement utilisées pour détecter des valeurs anormales, analyser la cause de ces anomalies, et surveillez la sécurité des barrages en temps réel. Compris la surveillance modèles, indices de surveillance et méthodes de détection des valeurs d'auscultation.

Chapitre III: Présentation du site d'étude

III.1. INTRODUCTION :

La mobilisation des ressources hydriques continue à être l'une des principales priorités dans la stratégie de développement en l'Algérie. La limitation des eaux souterraines et le changement climatique, imposent la construction des barrages réservoirs afin de satisfaire les besoins en eau.

Le barrage de Béni Haroun est une réalisation stratégique majeure dans le programme de développement du secteur des ressources en eau en Algérie. Il est conçu selon une nouvelle technique de réalisation des barrages (BCR). Il est doté d'une station de pompage considérée comme l'une des plus importantes au monde.

Ce chapitre présente la région d'étude, sa situation géographique, géologique, et un aperçu hydro-climatique.

III.2. La localisation du barrage :

Le barrage de Béni-Haroun est situé sur l'oued El Kabîr dans la wilaya de Mila (Est-Algérien). Il est alimenté par l'Oued Rhumel et l'Oued-Endja, Le bassin versant du Béni-Haroun est situé en grand partie sur le versant méridional du bombement tellien [50] [49]. Il fait partie du grand bassin Kabîr-Rhumel avec une superficie de 6595 Km². Ce bassin est limité naturellement par les limites du Kébir-Rhumel qui sont : au Nord par les bassins des côtières constantinois Ouest et Constantinois Centre (BV n°03) ; au Sud, le bassin versant des hauts plateaux Constantinois (BV n°07) ; à l'Ouest le bassin de Soummam (BV n°15) et à l'Est le bassin de Seybouse (BV n°14) (Fig III.1.) [49] [50].

L'ouvrage est de type poids rectiligne, en BCR (Béton Compacté au Rouleau), avec une longueur en crête de 710 m, arasée à la côte 216,3 m, une hauteur d'ordre de 118 m au-dessus des fondations. Le lac de la retenue épouse la partie captée de l'Oued El Kabîr et les deux vallées de l'Oued Rhumel et de l'Oued Endja, sur une surface de 39,29 Km², soit près de 4 000 ha. Le bilan pluie réservoir permet de déterminer un déstockage net par évaporation, équivalant à une tranche annuelle moyenne de 350 mm [49] [51] [52] [53].

La retenue permet d'emmagasiner 963 Hm³ d'eau, soit un volume utile de 732 Hm³, elle permet de régulariser un apport annuel de 435 Hm³, avec une réserve de 1 milliard de m³ d'eau atteinte le 12 Février 2012. Le barrage a été mis en exploitation en 2003 [51] [52].

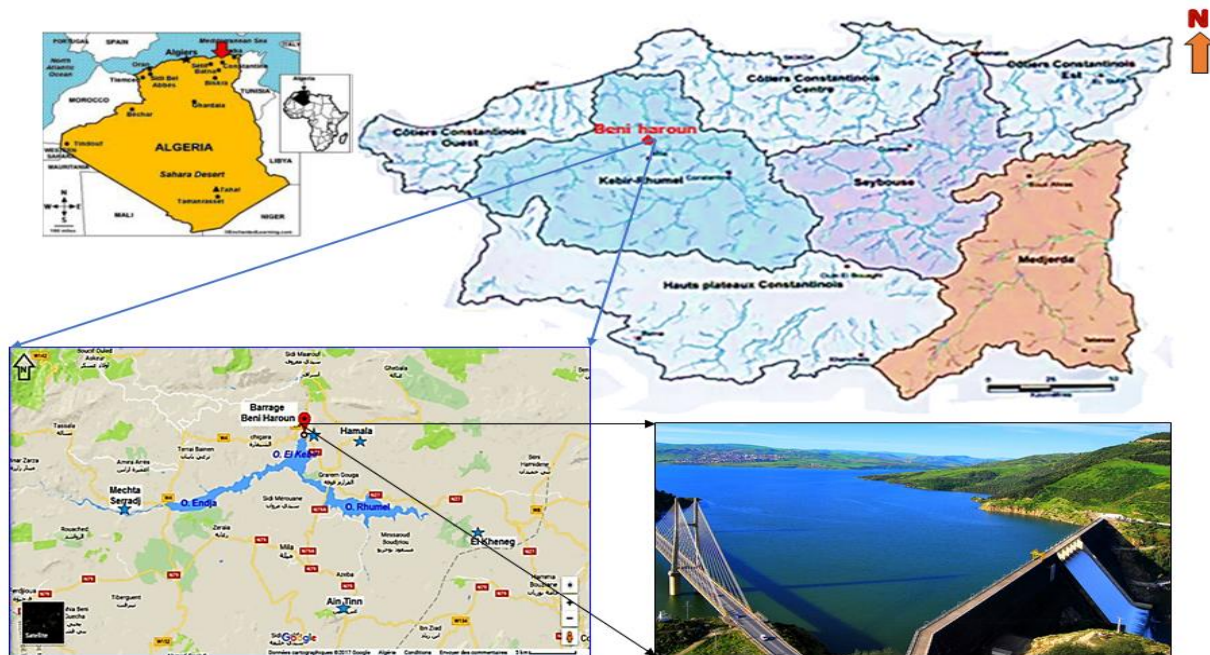


Figure III.1. Situation géographique du Barrage de Béni Haroun.

III.3. Géologie du site du barrage dans le cadre géologique régional :

La géologie locale s'inscrit dans un contexte tectonique complexe de chevauchements et de failles ou décrochements, caractérisé par des déformations plastiques (plissements) et cassantes (failles, fractures) des unités lithologiques du site. Ces unités sont constituées schématiquement d'une assise calcaire compétente (à comportement rigide – cassant) de 100 à 150 m d'épaisseur, encadrée par deux séries marneuses incompétentes (à comportement plastique - plissé - tectonisé).

Les calcaires, présentent une structure en synclinal, le barrage étant entièrement fondé sur le flanc Nord de celui-ci. Ce synclinal est évasé et à plan axial vertical plus ou moins ENEWSW en rive droite, les couches plongeant de 40° vers le SSE au droit de l'ouvrage. Ces couches se redressent progressivement vers le centre de l'ouvrage (plongement toujours vers le SSE) puis les bancs s'incurvent en direction du SSW en rive gauche, leur plongement se redressant jusqu'à la verticale, pour basculer finalement vers l'WNW (flanc renversé) [63].

Le site du barrage est approximativement à la cote 110 m sur l'Oued El Kébir à environ 3,5 km en aval de la confluence de l'Oued Rhumel et de l'Oued Endja. Un autre affluent, Oued El Dib, rejoint l'Oued El Kébir juste à l'amont du barrage.

Les terrains superficiels sont constitués par des dépôts alluviaux (divisés en 3 unités : terrasses anciennes, terrasses et alluvions actuelles) ainsi que des éboulis, des colluvions et des terrains glissés.

Les unités rocheuses présentes sur le site même du barrage sont de l'amont vers l'aval :

- Des marnes Eocènes (Em) présentes à l'amont de l'emprise du barrage. Ce sont des marnes déformées et altérées présentant à l'affleurement des schistes gris foncé à noirs avec la présence de septaria dans les faciès marneux.
- Sous l'emprise du barrage, une barre de calcaires Eocènes (Yprésien) qui, sur base des observations de terrain, peut être divisée en trois unités (Fig III.2) :
 - ✚ Calcaire marneux (Ecm) ;
 - ✚ Calcaire à silex (Ecs) ;
 - ✚ Calcaire de base (Ecb).
- Juste à l'aval de l'emprise du barrage, des marnes noires du Paléocène constituées de schistes de compaction gris foncé à noirs.
- Quelques affleurements de Trias à faciès gypseux bréchiqie sont observés en amont du barrage. Ils sont probablement associés à des zones faillées où la roche gypseuse a été injectée.
- La trace d'une faille apparentée à ce système de failles, a été cartographiée à 100 m en amont de l'axe du barrage. Le long de celle-ci, quelques affleurements de gypse triasique ont été observés dans les marnes Eocènes (Fig III.3) [63].

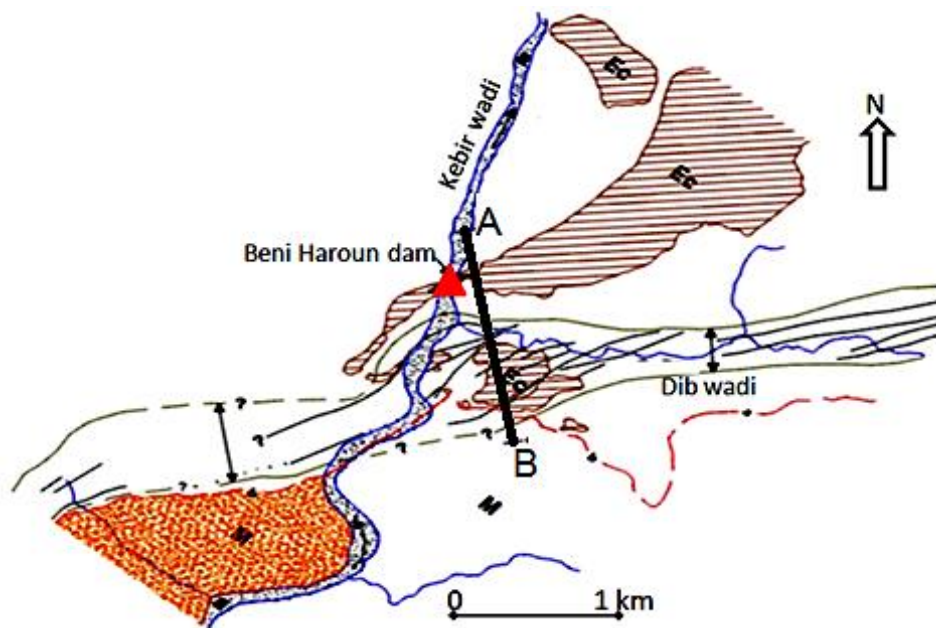


Figure III.2. Géologie du site du barrage de Beni Haroun [67].

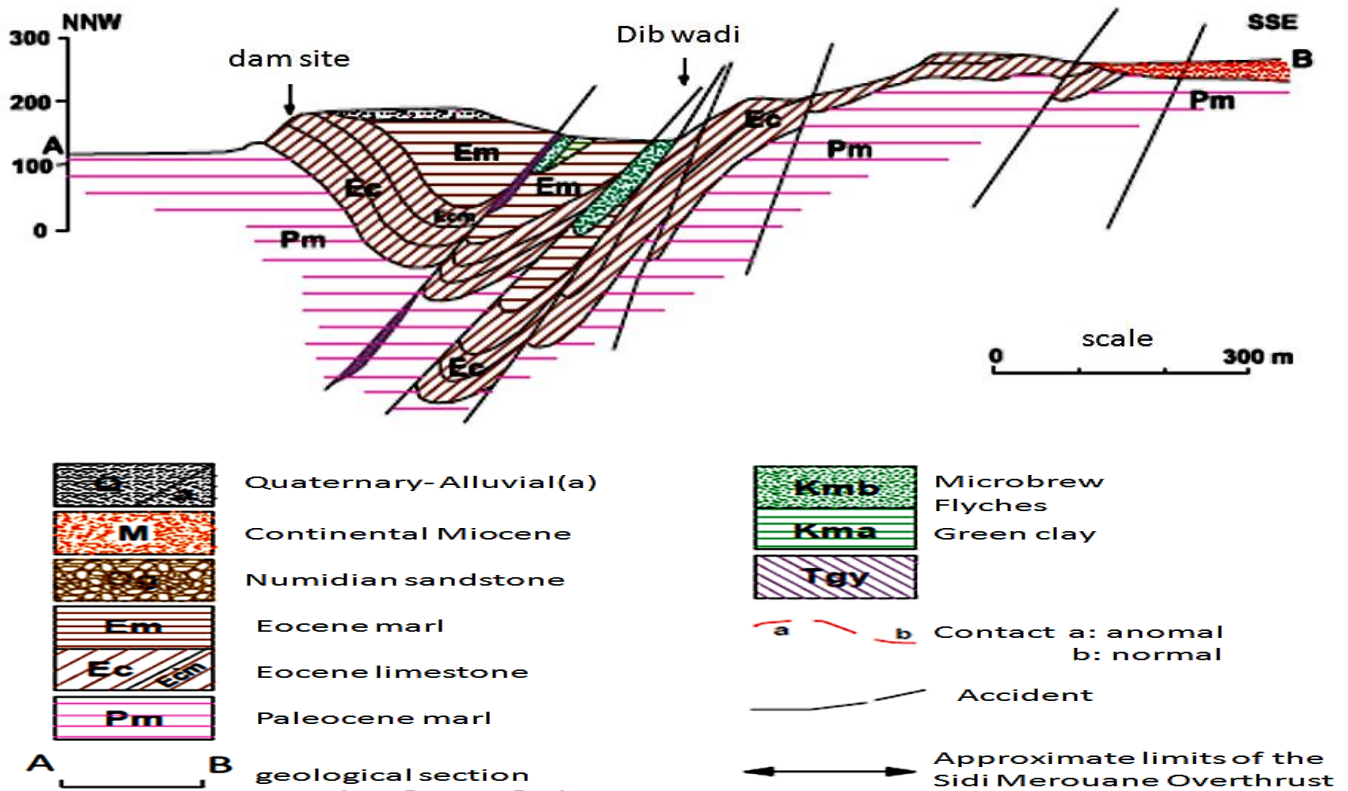


Figure III.3. : Coupe géologique du site de barrage de Beni Haroun. [67].

III.4. Réseau Hydrographique :

Le réseau hydrographique est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement (Fig.4). Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin.

Le réseau hydrographique du bassin de Beni Haroun est représenté par deux oueds importants : Oued Rhumel et Oued Enndja, avec les affluents de chaque oued ; et des chaabats plus dense au Sud et à l'Ouest. Cette densité des cours d'eaux joue le rôle d'un exutoire et drainent une superficie importantes [54].



Figure III.4. Bassin versant et réseau hydrographique du bassin de Beni Haroun [66].

III.5. Climatologie :

Le climat de la région est de type méditerranéen semi-aride au Sud et sub-humide au Nord de Constantine. Il est caractérisé par une forte variabilité inter-mensuelle et inter-annuelle de la pluie avec une nette décroissance de pluviosité du Nord (450 mm/an en moyenne) au Sud (320 mm/an en moyenne) [55].

Les données de la station météorologique du barrage de Béni Haroun. Montrent que la précipitation moyenne varie entre 200 et 1120 mm/an. La saison hivernale est la plus pluvieuse avec une moyenne de 104,86 mm/mois [56].

III.5.1. Les précipitations :

Les précipitations constituent évidemment, le paramètre climatique essentiel. Leur intensité, leur continuité et leur périodicité sont l'origine même de l'écoulement, de sa localisation et de sa violence. Ils constituent le facteur essentiel qui gouverne l'écoulement des cours d'eau. La pluviométrie croit du Sud au Nord, les pluies varient en moyenne de 318 mm au Sud du bassin à 1000 mm au Nord. Pour l'ensemble du bassin du Kabîr-Rhumel [57].

Durant la période (2003-2019), la précipitation moyenne maximale est marquée au mois de Janvier avec 97.4 mm, alors que le mois le plus sec est juillet avec 4.03 mm (Tab III.1 et Fig III.5).

Tableau.III.1 : Précipitation moyenne mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2003-2019) [68].

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Ann
P (mm)	50,56	58,93	78,17	81,58	97,4	75,06	77,54	69,48	52,73	16,13	4,03	15,82	677,79

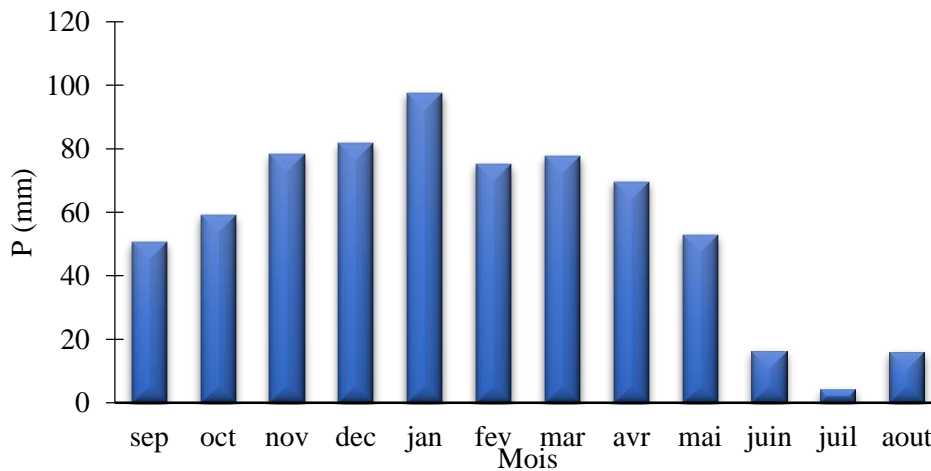


Figure III.5. Variation de la précipitation moyenne mensuelle interannuelle de la station de Beni Haroun (2003-2019).

III.5.2. Température :

Les températures moyennes mensuelles et annuelles régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologique (précipitations, insolation, ...etc.) le phénomène d'évaporation et par là même le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les températures sont donc l'un des éléments majeurs influençant le climat d'une région. C'est aussi cet effet caractéristique du régime thermique qui nous intéresse spécialement d'autant plus que l'évapotranspiration atteint des valeurs importantes dans notre site d'étude notamment en saison chaude [58].

Le (Tableau.III.2) donne les températures moyennes mensuelles interannuelles pour une période de 17 ans (2003-2019). On note que la température moyenne mensuelle la plus élevée est celles des mois de Juillet et Aout avec 26.98 et 26.69°C respectivement, donc ils sont les plus chauds, alors que les mois de Janvier et Février sont caractérisées par 7.61 et 7.79°C de température et qu'ils sont les plus froids.

(Figure III. 6).

Après avoir pris connaissance des résultats du tableau (Tableau.III.2), on constate que la valeur maximale de la température maximale est de 40,85 °C et le minimal est de 18,87 °C. Quant à la température minimale, la valeur maximale est de 15,36°C et la minimale est de -0,33°C.

Tableau.III.2 : Températures moyennes mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2003-2019) [68].

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moy ann
T max (°C)	36,65	32,6	24,84	19,97	18,87	20,15	24,75	28,41	32,53	38,23	40,85	40,19	29,83
T moy (°C)	22,38	18,42	12,29	8,78	7,61	7,79	10,69	14,05	17,8	22,93	26,98	26,69	16,36
T min (°C)	12,71	8,53	3,68	0,99	-0,26	-0,33	1,16	3,56	7,21	10,97	15,22	15,36	6,56

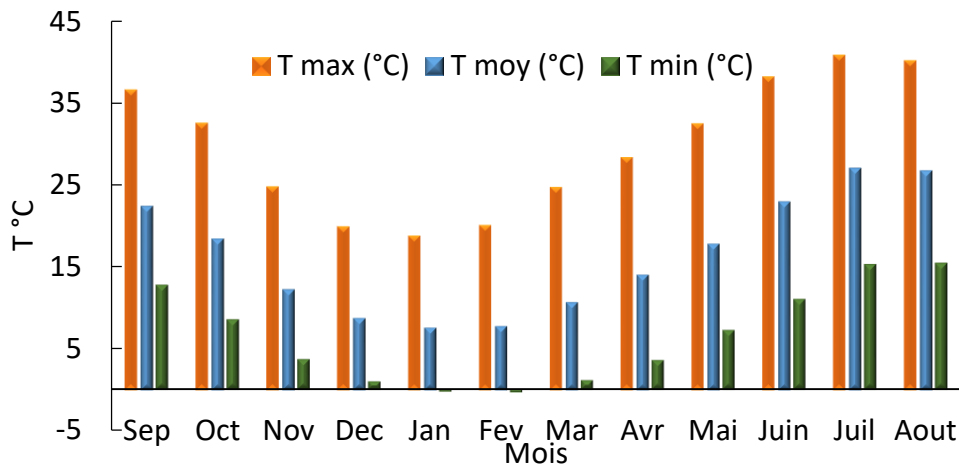


Figure III.6. Variation des températures mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2003-2019).

III.5.3. Le vent :

La région d'étude caractérisée par des vents soufflent du Nord- Est, souvent secs et froids, apportent les pluies. Mais les vents bénéfiques sont ceux de l'Ouest qui déplace des masses d'air chargées par la pluie. [57]. La vitesse du vent varie mensuellement entre 3 et 4 m/s, avec une moyenne annuelle de 3.5 m/s (tab III.3 , fig 7).

Tableau.III.3 : Moyennes mensuelles interannuelles de la vitesse du vent de la station de Beni Haroun, durant la période (2003-2019) [68].

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Ann
Vent (m/s)	3,02	3,31	3,82	3,79	4,03	4,07	3,92	3,52	3,32	3,06	3,09	3,1	3,50

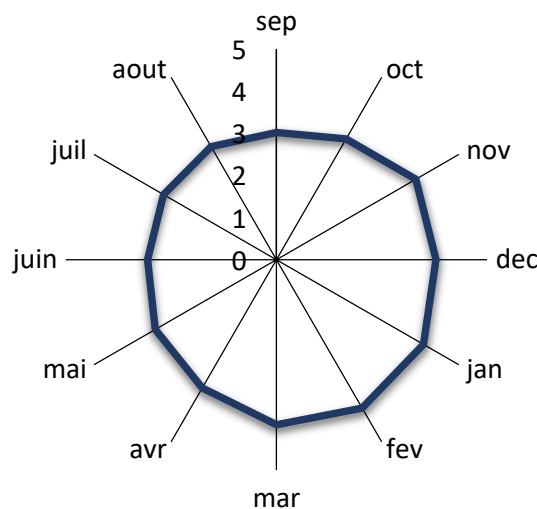


Figure III.7. Variation des moyennes mensuelles interannuelles de la vitesse du vent de la station de Beni Haroun, durant la période (2003-2019).

III.5.4. Evaporation :

L'évaporation représente le processus au cours duquel l'eau se transforme en vapeur. L'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration est connu sous le nom d'évapotranspiration. Cette dernière est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique [60].

Le phénomène de l'évaporation des lacs des barrages en Algérie est considérable ; une perte de volume très élevée est enregistrée annuellement dans les barrages. Les mesures de l'évaporation se font à l'aide d'un bac Colorado installé à proximité de la retenue du barrage de Beni Haroun [61].

Tableau.III.4 : évaporation moyennes mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2007-2019).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Moy
Evaporation (Hm ³)	0,177	0,109	0,058	0,036	0,036	0,048	0,077	0,108	0,16	0,258	0,309	0,36	0,144

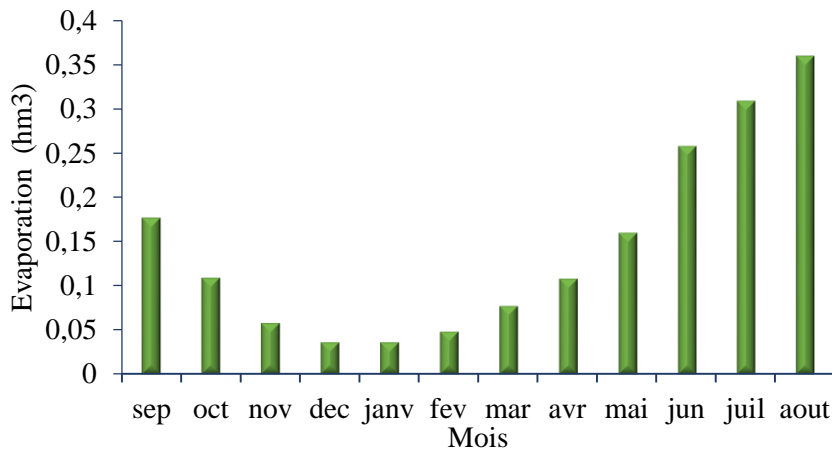


Figure III.8. Variation de l'évaporation dans le lac du barrage de Beni Haroun durant la période (2007-2019) [63].

Le graphe (Fig.III.8), présente l'évolution du volume évaporé dans la retenue de Béni Haroun, durant la période : 2007-2019. La valeur maximale évaporé est enregistrée aux mois d'Aout et Juillet, varient entre (0.360 – 0.309 hm³), et la valeur minimale est remarquée aux mois de Décembre et Janvier de 0.036 hm³.

III.5.5. Humidité :

C'est la quantité de vapeur d'eau contenue dans un m³ d'air exprimé en grammes dans l'air exprimé en mm de mesure, on distingue :

- Humidité absolue : c'est la quantité d'eau se trouvant dans l'air.
- Humidité relative : elle indique l'état plus ou moins proche de la condensation de la vapeur d'eau dans l'atmosphère [59].

La région est humide c'est –à-dire le pourcentage de l'humidité moyenne annuelle est égale à 68 % (fig III.9 , tab III.5).

Tableau III.5 : Humidité relative moyennes mensuelles interannuelles de la station de Beni Haroun (2003-2019) [68].

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Ann
Humd(%)	63,02	67,36	75,28	80,94	81,59	79,16	74,92	72,05	66,97	57,77	48,19	50,65	68,08

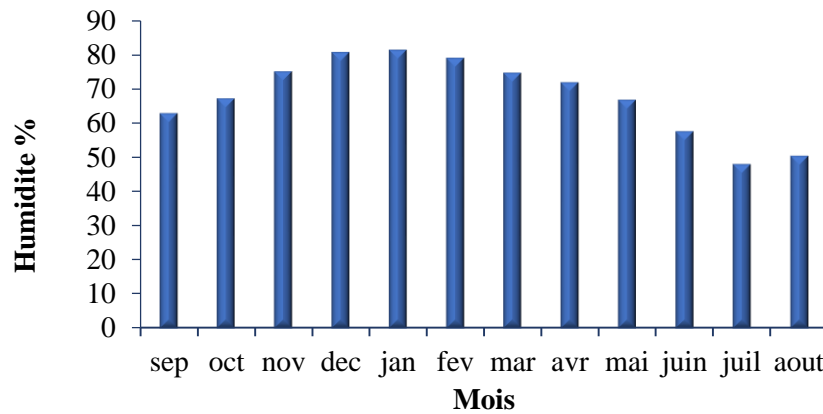


Figure III.9 : Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle interannuelle de la station de Beni Haroun (2003-2019).

III.6. Indique climatique :

III.6.1. Diagramme ombro-thermique de Bagnouls et Gausson :

Ce diagramme permet de déterminer les périodes humides et sèches. Le graphique mensuelle issue de cette application montre les précipitations en ordonnées à droite et les températures moyennes en °C en ordonnées à gauche avec une échelle double de celle des précipitations. Ce type de représentation permet d'apprécier la variabilité mensuelle des paramètres (pluie et température) et d'évaluer ainsi les contrastes saisonniers [62].

La (Figure III.10) montre une période sèche qui s'étend du mois de Mai au mois de Septembre et une période humide s'étend sur le reste de l'année.

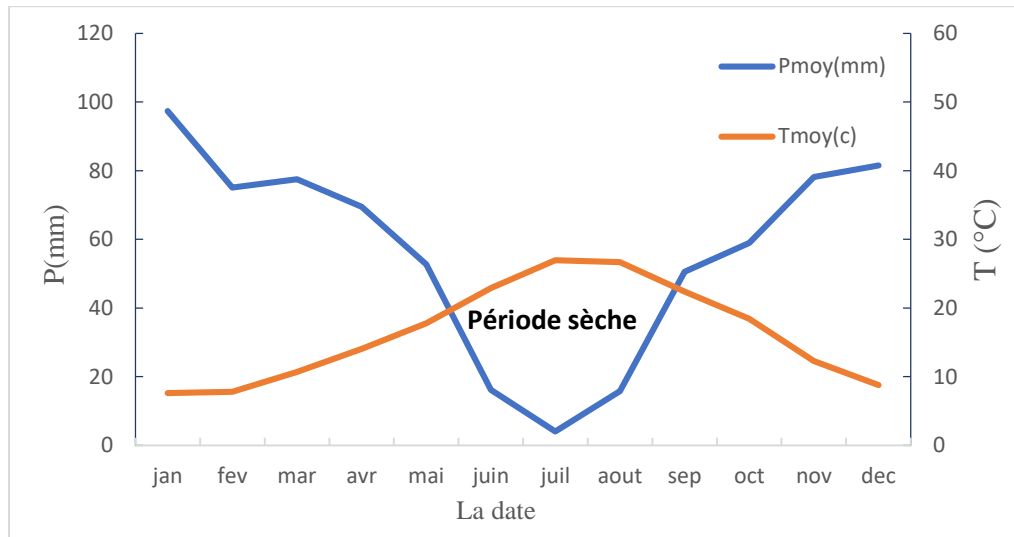


Figure III.10 : Le diagramme ombro-thermique de Bagnouls et Gausson de la station de Beni Haroun (2003-2019).

III.6.2. Indice de De Martonne ou d'aridité :

L'indice d'aridité est défini comme le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles, il est pour exprimer l'aridité d'une région, calculé par la relation suivante :

$$I = \frac{P}{T+10}$$

Avec :

I : Indice d'aridité

P : Précipitation moyenne annuelle en mm

T : Température moyenne annuelle en °C.

Pour :

- $20 < I < 30$: Climat tempéré
- $10 < I < 20$: Climat semi-aride
- $7.5 < I < 10$: Climat steppique
- $5 < I < 7.5$: Climat désertique
- $I < 5$: Climat hyperaride

Pour la station de Beni Haroun : $P = 677,79$ mm, $T = 16,42$ C°

D'après la formule N°(1) ; $I = 25,65$

L'indice d'aridité est entre 20 et 30, alors le climat de notre zone d'étude est tempéré (Fig. III.11).

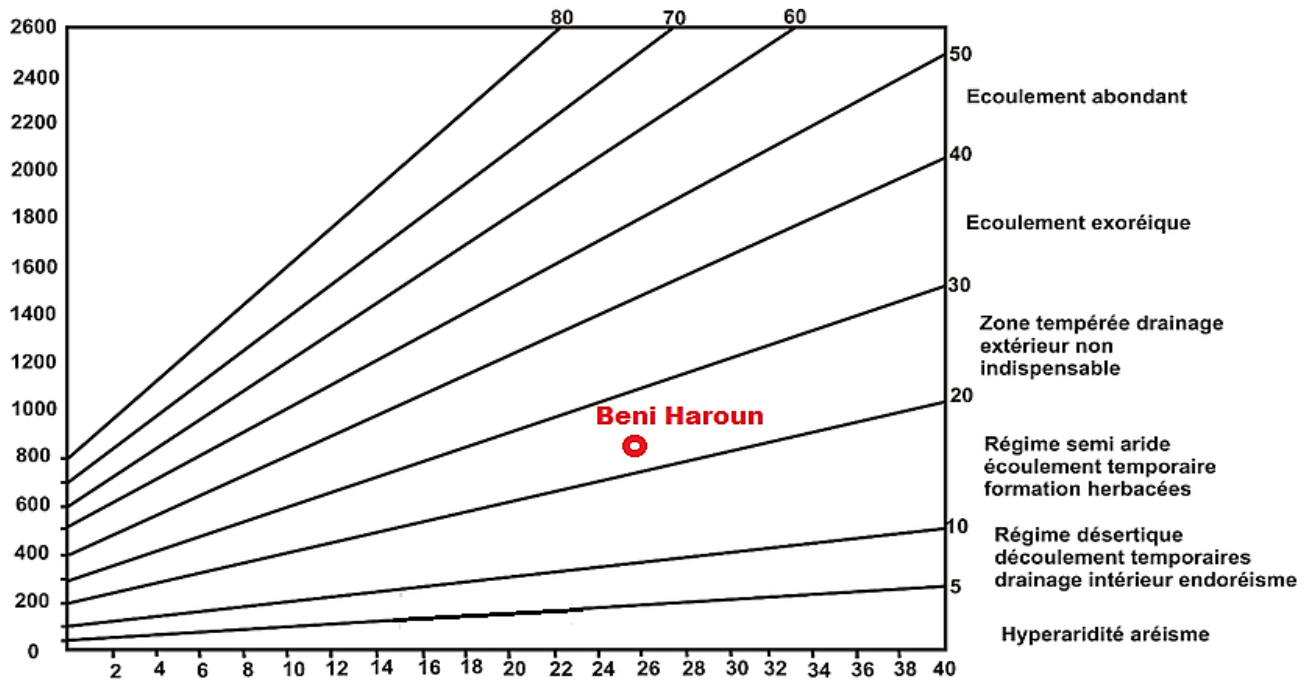


Figure III.11 : Diagramme de De Martonne.

Conclusion :

Ce chapitre donne un aperçu générale de la région d'étude, sa situation géographique, géologique, hydrologique et en plus climatique.

Sur le plan géologique, le site du barrage est localisé dans une barre calcaire Eocène d'environ 100 m d'épaisseur, présente une structure en synclinal, encadrée par deux séries marneuses à comportement plastique - plissé - tectonisée.

Sur le plan climatique la région d'étude est caractérisée par :

- ✓ Des précipitations moyennes annuelles de 677,79 mm/an.
- ✓ Des températures moyennes annuelles de 16,42 °C.
- ✓ Un climat tempéré défini bien par l'indice de Martonne.

*Chapitre IV: Traitement des données et
analyses des mesures*

IV.1. Introduction :

Les barrages sont parmi les ouvrages les plus sensibles aux facteurs externes (variation de température, pluviométrie, pression des eaux.... etc.), affectant leur stabilité et pouvant provoquer des dégâts humains, matériel, écologique...etc. Pour cette raison, il faut étudier et suivre le comportement de l'ouvrage.

Dans ce chapitre, nous étudierons et analyserons les mesures d'auscultation du barrage de Beni Haroun tel que : la piézométrie, la température de l'eau, la température du béton et le déplacement. Les données d'auscultation du barrage de Béni-Haroun sont fournies par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT).

IV.2. Piézométrie :

Quel que soit le type de barrage, sa fondation et ses appuis subissent des pressions dues à l'écoulement de l'eau à travers le rocher. La piézométrie a une grande utilité pour la détermination des zones défectueuses au niveau des rives et de la fondation du barrage [69]

Le barrage de Béni-Haroun a montré lors de sa première mise en eau, Décembre 2003 – Janvier 2004, une déficience « originelle » résultant de conditions géologiques particulières et complexes. Il s'agit de fuites importantes en aile gauche et de pressions anormalement élevées dans cette partie de l'ouvrage (sous pressions). Ce problème, immédiatement identifié par l'ANBT et son Ingénieur-conseil, qui avait réalisé la conception de l'ouvrage, a été analysé minutieusement (le barrage est équipé d'un système d'auscultation performant) et a donné lieu à la définition de mesures de renforcement judicieuses : extension du rideau d'étanchéité et du drainage dans la fondation [73].

La piézométrie a une grande utilité pour la détermination des zones défectueuses au niveau des rives et de la fondation du barrage. La variation de la cote piézométrique et la cote du lac au cours du temps permet de déduire les anomalies qui se produisent au niveau de la zone traversée par le piézomètre [69].

Les piézomètres installés dans le site du barrage de Beni haroun montrent un contrôle piézométrique du lac de la retenue par rapport à l'aquifère calcaire au niveau de la rive gauche, droite et du synclinal (Fig.IV.1).



Figure IV.1 : Localisation des piézomètres autour du site de barrage de Beni Haroun [75].

IV.2.1. Evolution temporelle :

❖ Rive droite :

L'évolution piézométrique dans cette rive est présentée dans le graphique suivant :

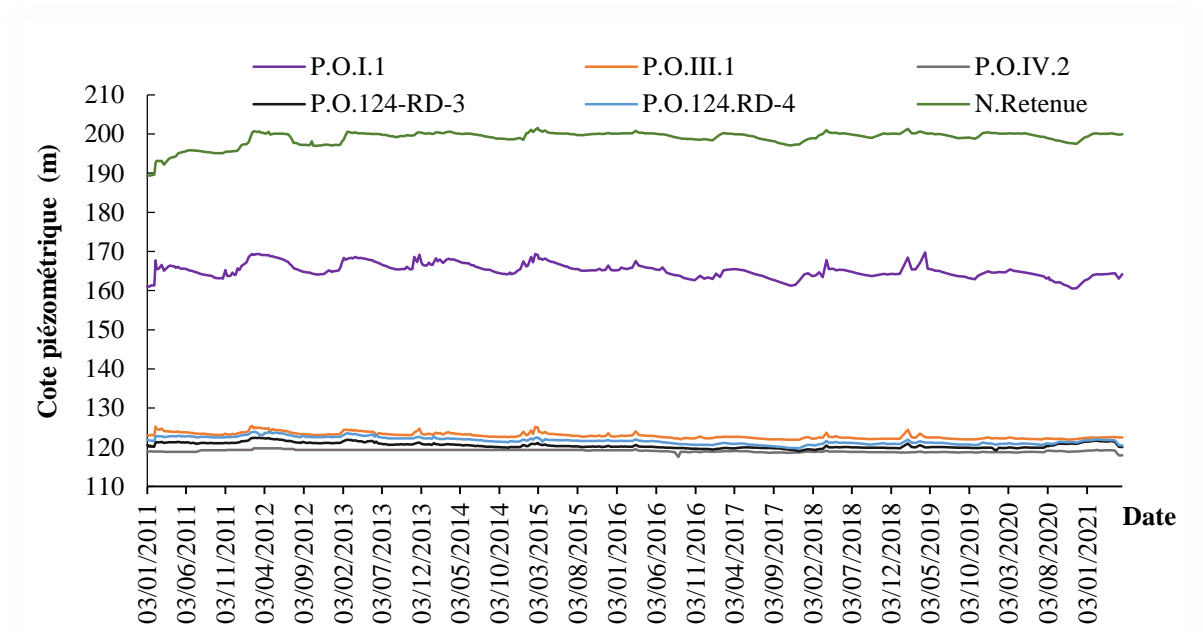


Figure IV.2 : Evolution piézométrique dans la rive droite (2011-2021).

D'après le graphe on remarque que les niveaux piézométriques dans les cinq piézomètres varient avec la même allure et suit la variation du niveau d'eau dans la retenue. La valeur maximale a été enregistrée 169,75 m en 2012 pour le piézomètre (*P.O.I.1*), la valeur minimale a été enregistrée au niveau du piézomètre (*P.O.IV.2*) est de 117,52 m et en 2021.

❖ **Rive gauche :**

Dans la figure IV.3 on observe une hétérogénéité dans la fluctuation des niveaux piézométriques, cela résulte de degré de fissuration des calcaires dans les zones traversés par les eaux d'infiltration pour atteindre les piézomètres.

D'après le graphe on remarque une augmentation du niveau piézométrique dans les piézomètres POVI, POV2 et PO RG A1 en 2012, avec un maximum de 193 m au niveau du PO RG A1 lors de cette années la retenue a atteint son maximale (1 milliard de mètre cube). On note la valeur minimale en 2020 au piézomètre P.O.V.2 de 108,01 m.

Le piézomètre P.O.VI.1 ne suit pas la variation de la retenue, donc on peut dire que l'alimentation de ce dernier s'effectuer à partir de la nappe des calcaires localisés à la rive gauche.

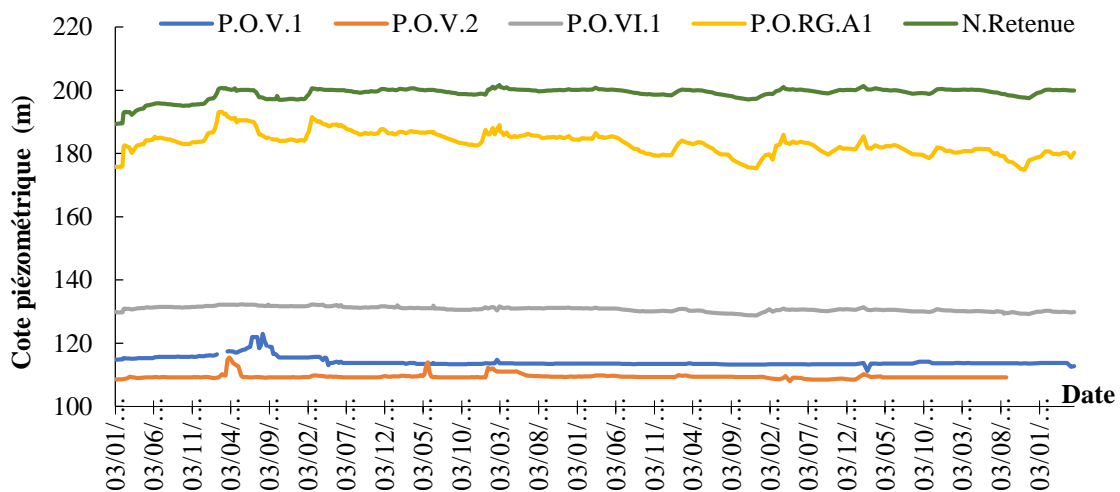


Figure IV.3 : Evolution piézométrique dans la rive gauche (2011-2021).

IV.2.2. Evolution spatiale :

- **La piézométrie au cours de la construction du barrage :**

La structure synclinale présente une terminaison occidentale raide, matérialisée par les affleurements calcaires de la rive gauche. Les circulations, en écoulement gravitaire, ont pu exploiter les discontinuités subméridiennes dans ces calcaires, pour contourner le cœur marneux du synclinal (Fig. IV. 4) [71].

Les circulations sont alimentées de façon concentrée sous les alluvions de la rive gauche. Elles empruntent deux types d'axes de drainage :

- ✚ Le contact entre le mur des calcaires et les marnes noires du paléocène au Nord-Ouest.

- ✚ Le réseau de discontinuités de brèches et de fractures, qui dirigent conjointement les Écoulements gravitaires en direction de la zone de sources du site du barrage [73] [72].

La mise en place du barrage a provoqué le rehaussement du seuil de déversement de l'aquifère karstique de 105 m, altitude approximative du talweg, à plus de 200 m, altitude approximative des seuils écreteurs du barrage [72].

Le gradient hydraulique a été porté à 60-70m et le seuil de déversement s'est vu déporté en rive gauche, sur le trajet naturel des circulations gravitaire qui contournent le cœur marneux du synclinal, et ce, en réutilisant des axes de drainage abandonnés au cours du creusement de la cluse [72].

Le schéma d'écoulement dans les calcaires implique un long cheminement, confirmé par un retard d'au moins 50 jours, et en moyenne d'une centaine de jours, entre les cycles de températures de la retenue et ceux observés à l'aval en rive gauche [73].

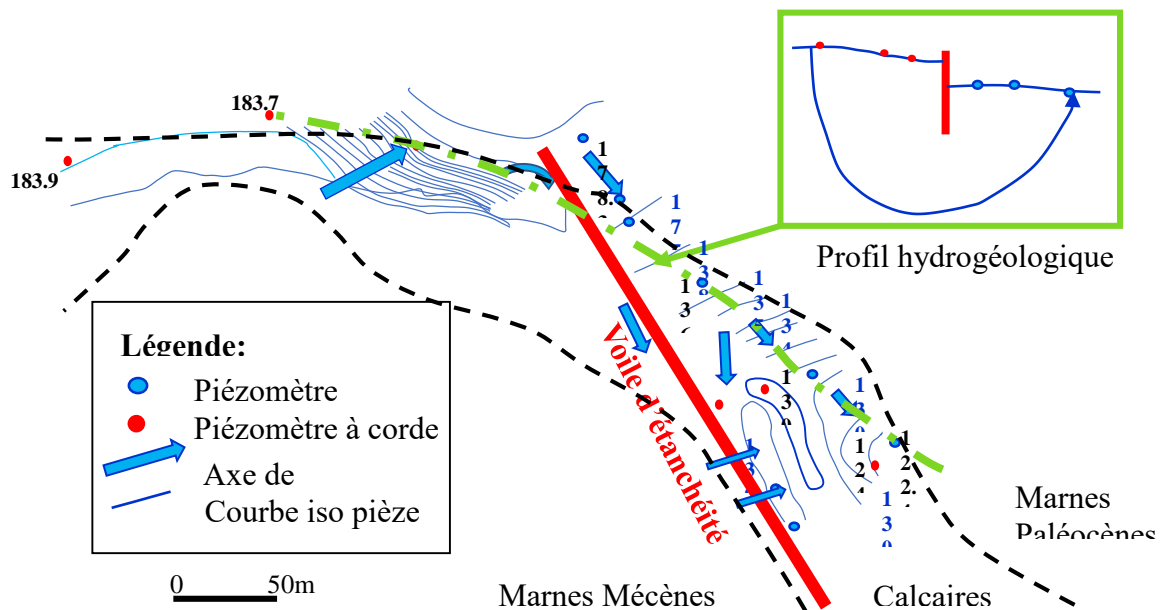


Figure IV.4 : Circulation des eaux souterraines dans la nappe calcaire au cours de la construction du barrage [71] [73].

- **La piézométrie après l'implantation du barrage**

Il existe un écoulement lent du Sud vers le Nord, le long du barrage d'un niveau de 135 m à 115 m (Fig. IV.5).

Dans la rive droite le sens d'écoulement est Est-Ouest vers le cours d'eau.

A partir des données piézométriques, on remarque que, même si le niveau d'eau dans la retenue augmente, le niveau d'eau dans la plupart des piézomètres ne bouge pas, sauf des petites perturbations au cours des saisons pluvieuses (Fig. IV.5).

Au piézomètre POI1 et POI2 on observe une réponse différente, c'est-à-dire le niveau d'eau est plus haut que celui des autres piézomètres, et le niveau augmente au moment de crue, cela signifie une relation avec la pluviométrie et que l'infiltration est rapide dans des endroits limités.

Dans la rive gauche les courbes sont resserrées avec un sens d'écoulement Sud Est – Nord-Ouest, ce qui indique l'existence d'un écoulement rapide à partir d'une nappe (Calcaire fissurés) et des eaux du lac. Un gradient hydraulique susceptible d'entretenir des circulations souterraines entre le lac et l'aval du barrage, qui s'exprime préférentiellement en rive gauche. Cette rive présente une différenciation remarquable par rapport à la rive droite, cette différence est située au niveau des piézomètres PORG A1, PORG A42 où le niveau d'eau dans ces piézomètres évolue avec celui du plan d'eau du barrage, cela signifie l'existence d'une relation directe barrage-nappe.

On conclue que les observations piézométriques en rive gauche du barrage montrent que la perméabilité de ces calcaires est anisotrope, elle est plus élevée parallèlement que transversalement aux couches, impliquant des circulations parallèle à la stratification. La sous pression du barrage est plus développé en rive gauche qu'en rive droite [75].

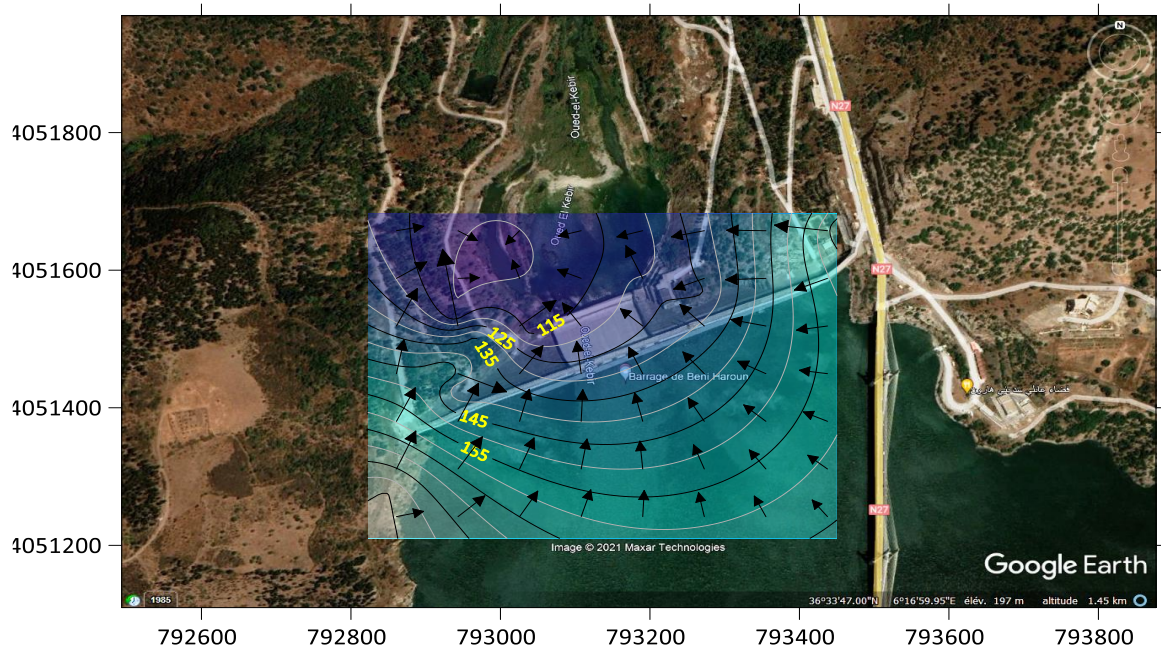


Figure IV.5 : Piézométrie des fondations du barrage de Beni Haroun (Février 2019) [75].

IV.3. Mesure de température :

L'évolution des températures de l'eau du lac de Beni Haroun a été suivie de façons régulières depuis la fin 2011 l'évolution de ces températures est représentée dans la figure IV.6.

IV.3.1. Température de l'eau :

La figure IV.6 représente l'évolution de la température journalière des eaux du lac à plusieurs niveaux, durant la période 2011-2018, nous constatons que la température de l'eau augmente avec la température de l'air selon une variation sinusoïdale, ou les valeurs maximale sont atteinte en été (TO-H : 40 °C, en 2011), et diminue en hiver, pour atteindre une valeur de (TO-D : 8,3 C°, en 2012).

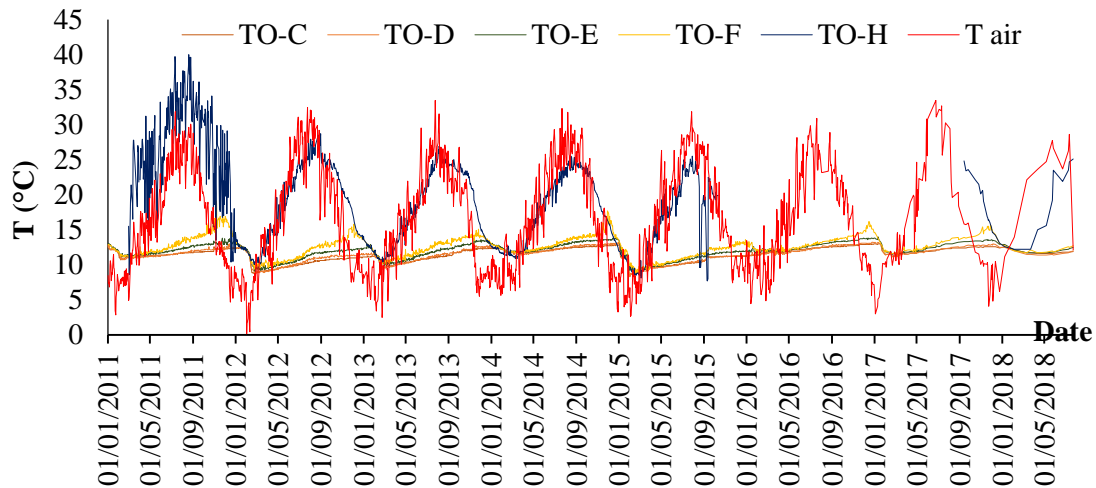


Figure IV.6 : Evolution temporelle de la température de l'eau (2011-2018)

IV.3.2. Température de béton :

Les températures et les conditions atmosphériques ont de multiples impacts sur les ouvrages hydrauliques. Ces impacts sont principalement liés aux changements des températures au sein d'une structure et de ses fondations et aux phénomènes de gel-dégel. Les températures de l'air influencent directement les températures dans la structure, alors que les conditions atmosphériques (rayonnement solaire, rayonnement UV, nuages, etc.) peuvent accentuer ces phénomènes [74].

Les propriétés mécaniques du béton compacté par rouleau (BCR) changent considérablement avec la température. Le transfert thermique de surface produit des gradients de contrainte élevés près de la surface exposée au rayonnement solaire, les cycles diurnes de température peuvent induire des fissures [74].

La température du béton est influencée directement par variation journalière et saisonnière de la température de l'air (fig. IV.7 à, b), et la position du teneur et son éloignement à la surface.

Les teneurs (T-H-VI 1, T-G-VI 1, T-G-V1, T-D-VI-2, T-F-V-1, T-E-VI-1, T-A-VI-1, T-A-IV-1, T-E-V-1, T-F-VI-2) ont été placés dans des profils (IV, V ,VI) positionnés à partir de la surface du béton allons vers la profondeur successivement cité, ou en remarque que le teneur T-H-VI-1 enregistre une valeur maximale qui peut atteindre 23.6 °C (Fig.IV.7.a), et le teneur T-F-VI-2) enregistre une valeur minimale de 13°C (Fig. IV.7.b).On remarque aussi que la température varie d'une fluctuation sinusoïde dans les teneurs localisé à la surface avec un écart important entre les valeurs maximale et minimale.

Dans teneurs situés en profondeur du béton l'écart se diminue et la fluctuation tend à se stabiliser.

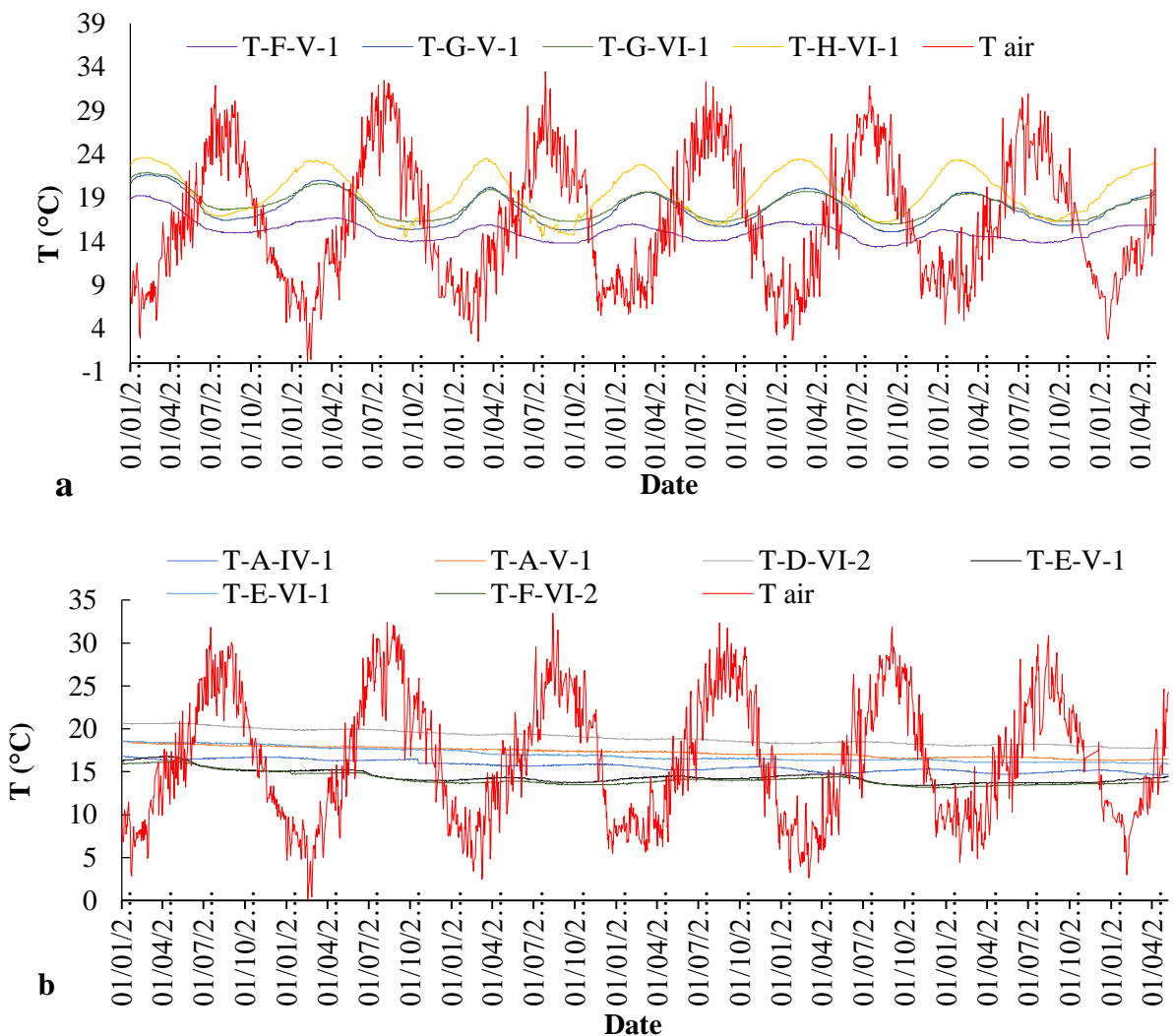


Figure IV.7 (a, b) : Evolution temporelle de la température du béton (2011.2021).

IV.4. Mesure de déplacement :

L'analyse et l'interprétation des déplacements sont fondamentales, car ils sont représentatifs du comportement global de l'ouvrage et sa déformation. Chaque évolution anormale du comportement du barrage ou de sa fondation a un effet sur les déplacements. Généralement le déplacement imprévu du barrage dû à des fuites importantes qui vont créer des sous pressions, pouvant propager les fissurations et engendrer un renversement [70].

Le barrage de Beni Haroun est équipé de 40 pendules directs et inverses (figure IV. 8), qui fournissent des mesures radiales et tangentielles, localisé à plusieurs côtes du barrage (100 m, 105 m, 140 m et 175 m), placés sur 06 profils. La convention de signe adoptée est la suivante : un déplacement vers l'amont est positif et vers l'aval est négatif. Les mesures de déplacement étudiées couvrant une période de 9 ans (2012 - 2021).

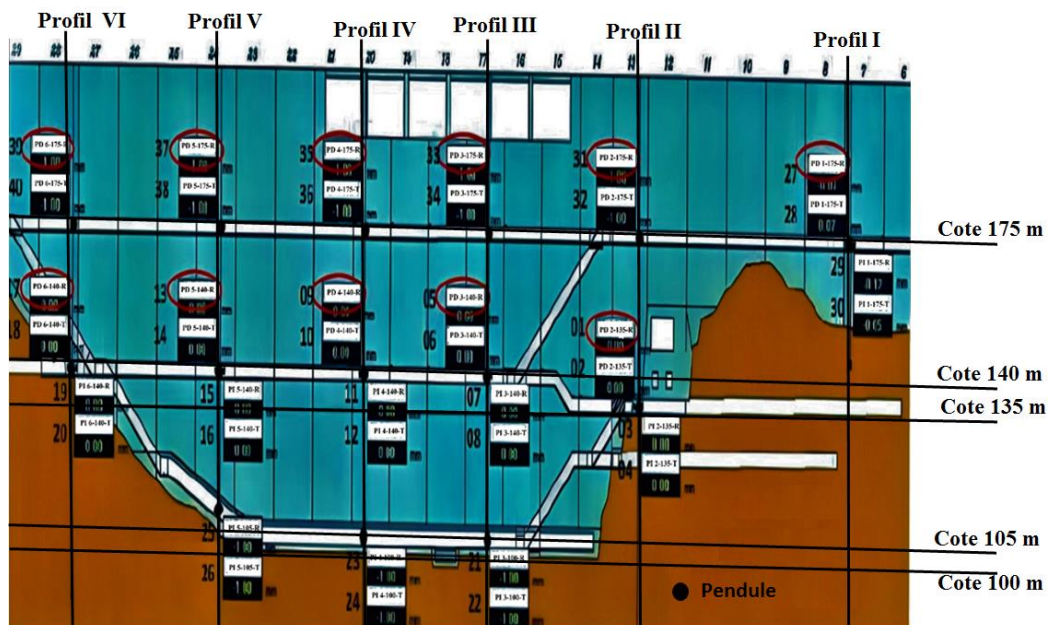


Figure IV.8 : Emplacements et numéros des pendules du barrage Béni-Haroun [9].

IV.4.1. Fondations (cote 100 m et 105 m) :

Les déplacements des différents pendules au niveau des fondations sont varié entre 0 mm (P I III 100 T) et +2.27 mm (P I III 100 T), et ont la même allure A la cote 105 m en enregistre des déplacements allant de -14 .45 mm au (P I V 105 R) à -5 mm au (P I V 105 T) (Fig. IV. 9).

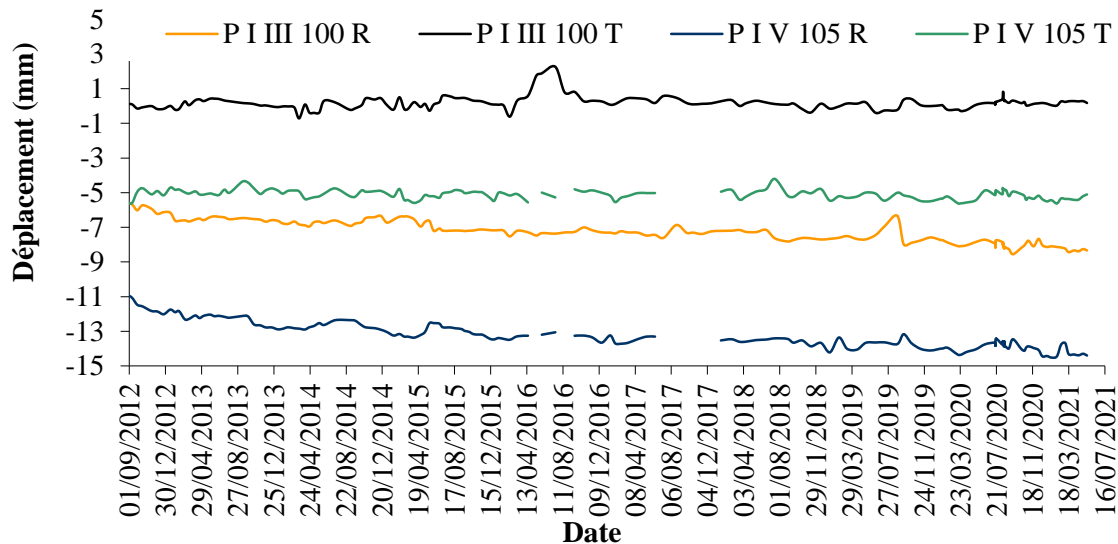


Figure IV.9 : Evolution temporelle du déplacement des pendules à la cote 100 m, au niveau des fondations (2012 - 2021).

IV.4.2 Corps du barrage (cote 140 m) :

La Figure .IV.10 (a, b) représente le déplacement temporelle dans 7 pendules cités dans le tableau IV.10, ou on remarque un déplacement radial maximal de (-24.57 mm) enregistré au niveau du pendule PI IV et un déplacement minimal de 1.24 mm au niveau des deux pendules PD IV et PD VI. Concernant le déplacement transversal enregistre une valeur maximale de - 10.51 mm au pendule PI V et une valeur minimale au PD III de 1.04 mm (Tab IV.1).

Tableau IV.1 : Déplacement des pendules a la cote 140 m (2012-2021).

N du pendule	Déplacement Transversale (mm)		Déplacement Radiale (mm)	
	max	min	max	min
PD III	3.96	1.04	12.56	1.24
PD IV	5.50	1.40	14.23	-3.34
PD V	6.61	4.24	18.19	4.45
PD VI	2.46	-1.11	13.51	1.24
PI III	4.60	-2.08	-20.14	-5.58
PI IV	-6.73	-3.74	-24.57	-16.35
PI V	-10.51	-6.99	-24.51	-14.70

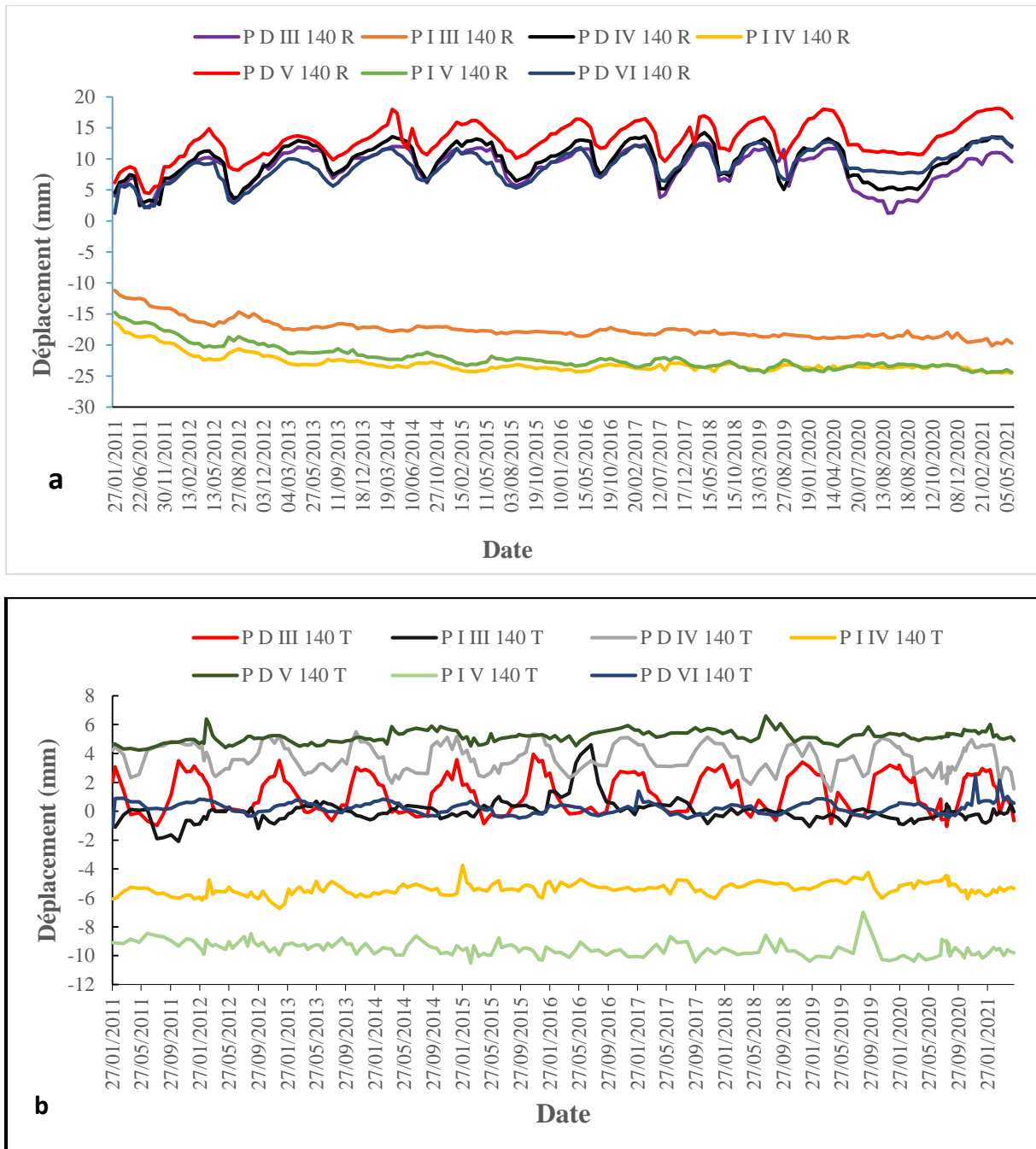


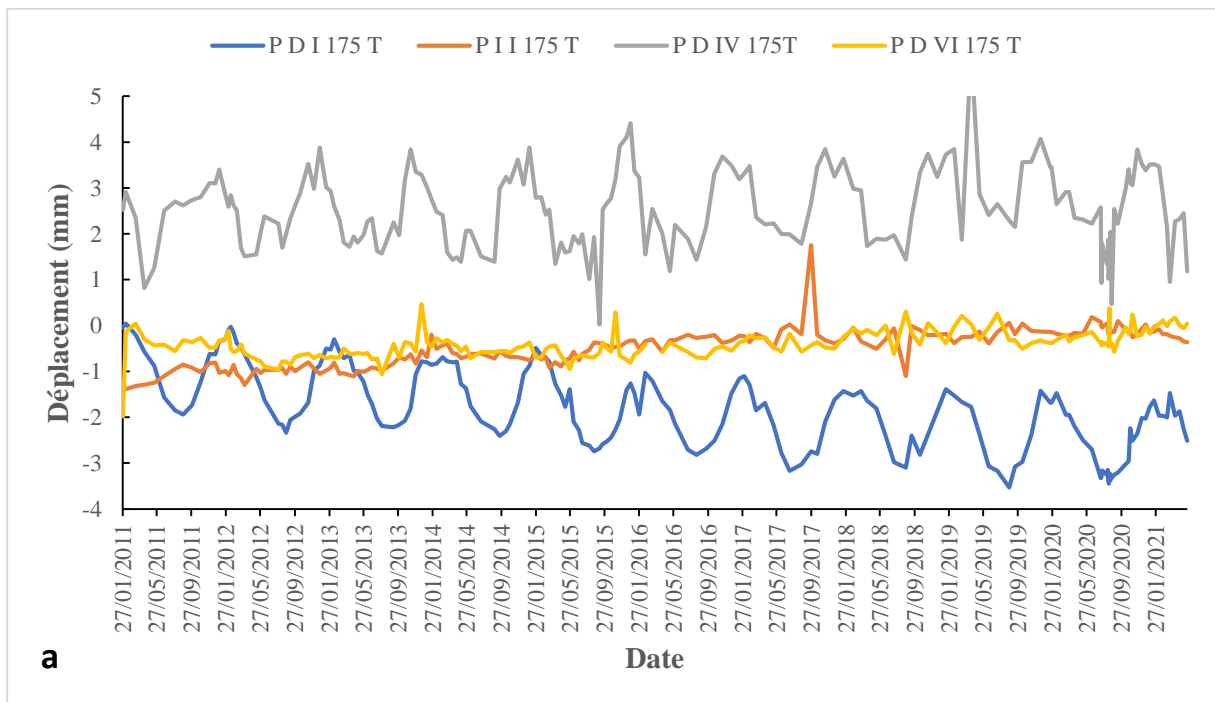
Figure IV.10 (a, b) : Evolution de déplacement pendules (cote 140) au niveau du corps du barrage (2012 - 2021).

IV.4.3 La crête (cote 175 m) :

A ce niveau on observe un déplacement radial maximal de (8.92 mm) enregistré au niveau du pendule PD V et un minimal de -0.2 mm mesuré dans le même pendule. Le déplacement transversal a une valeur maximale de 6.01 mm au pendule PD IV et une valeur minimale au PD I de 0.04 mm (Tab IV.2).

Tableau IV.2 : Déplacement des pendules a la cote 175 m (2012-2021).

N du pendule	Déplacement Transversale (mm)		Déplacement Radiale (mm)	
	max	min	max	min
PD I	-4.15	0.04	-8.76	-2.50
PD II	-3.86	-0.96	-6.59	0.65
PD III	3.13	-2.35	6.56	-0.98
PD IV	6.01	-1.93	7.82	-6.56
PD V	3.81	-1.22	8.92	-0.20
PD VI	-1.98	0.47	5.58	-2.24
P II	1.75	-1.39	4.41	2.16



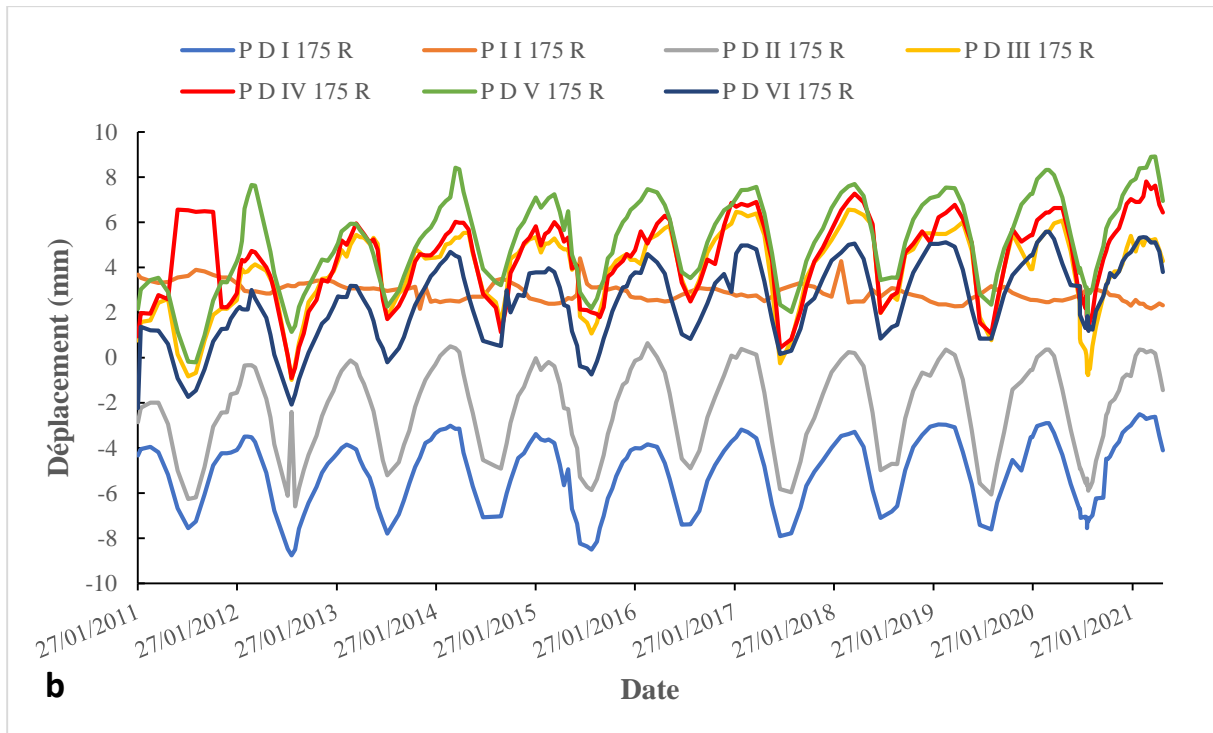


Figure IV.11 (a,b) : Evolution temporelle de déplacement des pendules (cote 175), au niveau de la crête (2012 - 2021).

- **Discussion :**

A partir des mesures de déplacement analysé, on constate que le déplacement :

- ✚ Au niveau (cote 175m), la crête est déplacée vers l'amont avec une valeur maximale de 8.92 mm (PD V), cela induit par un échauffement (origine thermique) ;
- ✚ Au niveau du corps de barrage (cote 140 m), le déplacement est orienté vers l'aval avec un maximum de -24.57 mm observé au niveau du pendule PI IV, cela due à l'élévation du niveau de la retenue qui peut engendrer, une augmentation dans la pression hydrostatique exercée sur le barrage et vice versa, ce qui fait, pour un niveau d'eau élevé le déplacement du pendule sera important ;
- ✚ Pour les fondations (cote 105 m) le déplacement max est de -14.45 mm enregistré au pendule P1 V 105 R, ceci est peut-être dû à des poussées des terres (vase).

Conclusion :

L'auscultation vise à détecter suffisamment tôt des discontinuités, des évolutions significatives, des irréversibilités traduisant des désordres. Il s'agit toujours des déplacements

annoncés par des phénomènes précurseurs : montée de pression interstitielle, fissures, ouverture de joints...etc.

Les mesures des différents paramètres : température (eau, béton), piézomètre et déplacements sont importants pour surveiller la stabilité et les performances du barrage.

- Les mesures de température peuvent aider à identifier les zones du barrage qui risquent de surchauffer .
- La piézométrie peut aider à identifier les zones de fuite .
- Les mesures de déplacement peuvent aider à identifier tout changement dans la forme ou la position du barrage, ce qui pourrait être un signe de stress ou d'instabilité.

*Chapitre V: Prédiction du déplacement
du barrage de Beni Haroun à l'aide de
RNA*

V.1.Introduction :

La surveillance des barrages implique généralement des variables environnementales (par exemple, le niveau et la température de l'eau) et des variables d'effet (déformation, fissuration, infiltration, etc.)[79]. La surveillance des barrages fournit une analyse de mesures chronologiques de déplacement issues de différents dispositifs équipant l'ouvrage [80]. Par conséquent, la recherche de méthodes d'analyse des données de surveillance est très importante pour la surveillance de la sécurité des barrages. Bien que les modèles statistiques (par exemple, HST et HTTTS) aient été largement utilisés pour la prédiction de la déformation, ils sont difficiles à gérer des relations complexes et non linéaires entre les variables prédictives et la déformation, en particulier pour les barrages pendant les périodes d'exploitation initiale et de renforcement [82] [83] [81]. L'étude présentée applique une méthode statistique plus flexible, le Réseau de Neurones Artificiels (ANN) pour prédire le déplacement du barrage.

Les réseaux de neurones offrent la possibilité de modéliser des données non linéaire d'entrée au moyen de l'ajustement des connexions internes au réseau, de sorte que pour une entrée donnée de la différence entre la sortie du réseau et la réponse souhaitée, l'erreur est minimisée [76].

L'objectif principal de cette partie est de sélectionner les meilleurs modèles RNA issues des deux types de RNA testé dans cette étude (CFBP, FFBP) pouvant prédire le déplacement du barrage de Beni Haroun.

V.2. Données et méthodes :

Ces dernières années, l'usage du RNA s'est répandu dans des domaines aussi variés que la science économique, la biologie ou la médecine [84]. Ils sont appliqués pour résoudre des problèmes de classification, de reconnaissance de formes, de régression, etc. [85]. Ce type de fonction implicite imite le schéma neuronal humain pour apprendre à partir d'un ensemble de prédicteurs afin de prédire une quantité donnée [81].

Le travail réalisé porte sur l'analyse d'un ensemble de mesures pendulaire du barrage de Béni-Haroun pour une période de 10 ans par les algorithmes FFBP et CFBP. L'analyse consiste à calculer les déplacements relatifs à chaque effet, ainsi que les déplacements corrigés ; afin de pouvoir examiner le comportement du barrage au fil du temps. Le modèle construit pour prédire le déplacement du barrage de Beni Haroun est constitué de 7 neurones

dans la couche d'entrées, 10 neurones dans la couche cachée, et 1 neurone dans la couche de sortie (Figure V.1).

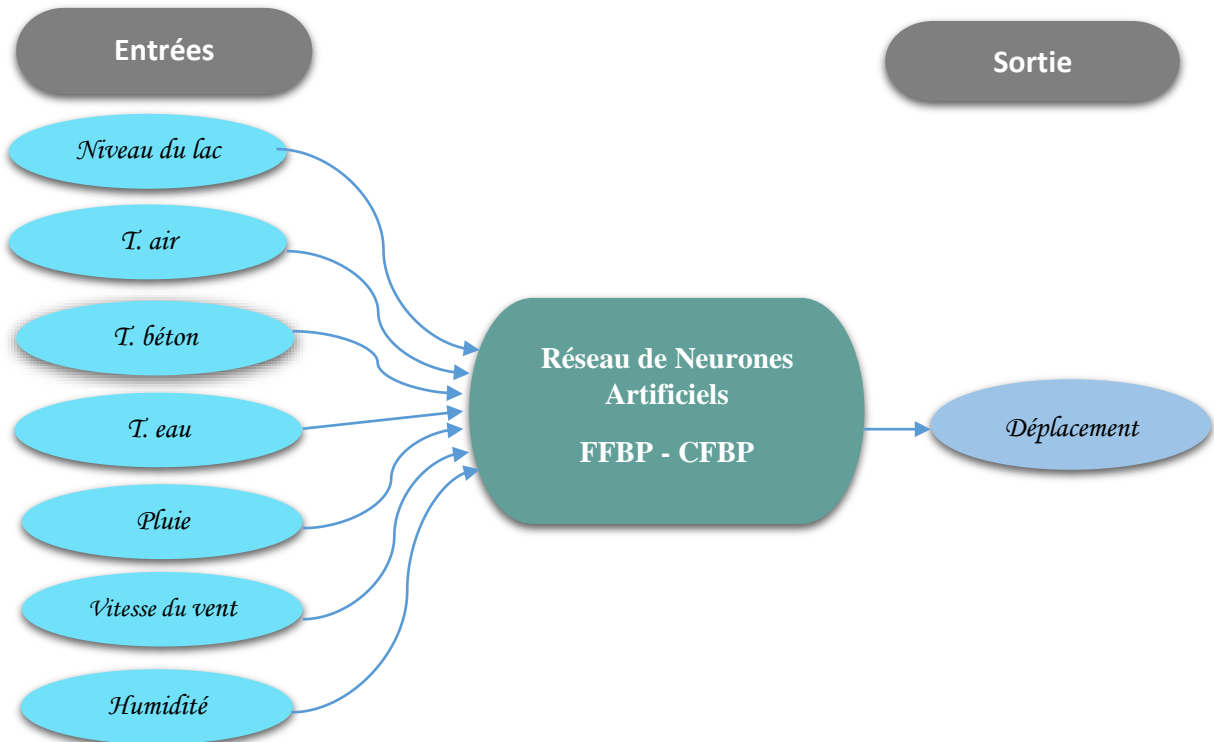


Figure V.1. Schéma général du modèle FFBP et CFBP pour la prédiction du déplacement du barrage.

V.2.1. Réseaux de neurones feed-forward backpropagation (FFBP) :

C'est le réseau hautement interconnecté de neurones artificiels inspiré par le système nerveux humain, travaillant en union pour effectuer une tâche donnée et, à la fin, donne la décision basée sur les poids et les biais pour les données d'entrée complexes [88].

La particularité de ce type de réseaux est que l'information se propage dans un sens unique, sans aucune rétroaction (des entrées vers les sorties). Ce genre de réseaux utilise un apprentissage supervisé, par correction des erreurs ou le signal d'erreur est rétro-propagé vers les entrées afin de mettre à jour les poids des neurones [77] [86] [87].

V.2.2. Réseaux de neurones Cascade_forward backpropagation (CFBP) :

L'entraînement de ce réseau implique à la fois d'ajuster les poids et de modifier l'architecture du réseau. La méthode implique un processus de musculation en deux étapes où une seule couche de poids est entraînée à tout moment.

Le filet de corrélation en cascade possède des unités cachées et d'entrée qui sont associées de manière indéfectible aux unités de sortie avec des connexions pondérées réglables [78].

V.3. Critères d'évaluation de la performance du modèle :

Les performances des modèles sont évaluées à l'aide de mesures statistiques pour déterminer la qualité et la fiabilité des simulations en le comparant aux valeurs observées. Ces tests d'erreur statistique étaient : L'efficacité de Nash Sutcliff (NSE), le Coefficient de Détermination (R^2), l'Erreur Quadratique Moyenne et (RMSE) ont été utilisés car ils sont largement applicables en modélisation hydraulique [14]. Le coefficient de détermination (R^2) et l'efficacité de simulation de Nash-Sutcliffe (NSE) étaient la qualité des mesures d'ajustement utilisées pour évaluer la prédiction du modèle. La valeur R est un indicateur de la force de la relation entre les valeurs observées et simulées. L'efficacité de simulation de Nash-Sutcliffe (ESN) indique dans quelle mesure le tracé de la valeur observée par rapport à la valeur simulée (Nash et Sutcliffe, 1970). Si la valeur mesurée est la même que toutes les prédictions, NSE est un. Si le NSE est compris entre zéro et un, il indique des écarts entre les valeurs mesurées et prédites (Nash et Sutcliffe, 1970). L'autre mesure statistique largement utilisée est le coefficient de détermination (R^2) qui décrit le degré de co-linéarité entre les données simulées et observées. Le coefficient de corrélation indique la précision d'un modèle. Le coefficient de détermination (R^2) est compris entre zéro et au moins un ; Un indique une prédiction parfaite alors que zéro montre une prédiction médiocre [89].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{o,i} - D_{p,i})^2}$$

$$R^2 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{o,i} - \overline{D_o}) * (D_{p,i} - \overline{D_o})^2}{\sum_{i=1}^n (D_{o,i} - \overline{D_o})^2 * \sum_{i=1}^n (D_{p,i} - \overline{D_o})^2}$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (D_{o,i} - D_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^n (D_{o,i} - \overline{D_o})^2}$$

Où $D_{o,i}$ est le déplacement observé, $D_{p,i}$ est le déplacement prédit, $\overline{D_o}$ est la valeur moyenne du déplacement observé et $\overline{D_p}$ est la valeur moyenne du déplacement prédit.

V.4. Résultats et discussion :

Les résultats des algorithmes utilisant FFBP et CFFBP ainsi que leur comparaison sont présentés dans cette section.

V.4.1. feed-forward backprop (FFBP):

Deux algorithmes sont considérés pour prédire le déplacement du barrage en utilisant FFBP et CFBP. Pour chaque technique, la performance est représentée sous la forme de RMSE, NSE et R^2 , qui sont présentés dans le tableau V.1.

Selon les critères d'évaluation statistique appliquée, Le modèle FFBP donné des meilleurs résultats par rapport au CFBP.

Une comparaison des données de déplacement du barrage mesuré et prévues avec la ligne d'accord parfaite est présentée à la figure V.2 pour la phase d'apprentissage, validation, test et toutes les données. Les résultats du modèle FFBP montrent dans la phase de tous les données (All), l'Erreur Quadratique Moyenne et (RMSE) est de 0.345, L'efficacité de Nash Sutcliff (NSE) est de 0.964 et le Coefficient de détermination (R^2) est de 0.931. Le coefficient de détermination (R^2) obtenu pour les phase (Apprentissage, Validation, Test) est signifié que les valeurs de déplacement prévues sont très proches aux valeurs observées pour tous les ensembles de données.

La figure suivante montre les diagrammes de l'apprentissage, validation et de test de l'algorithme FFBP.

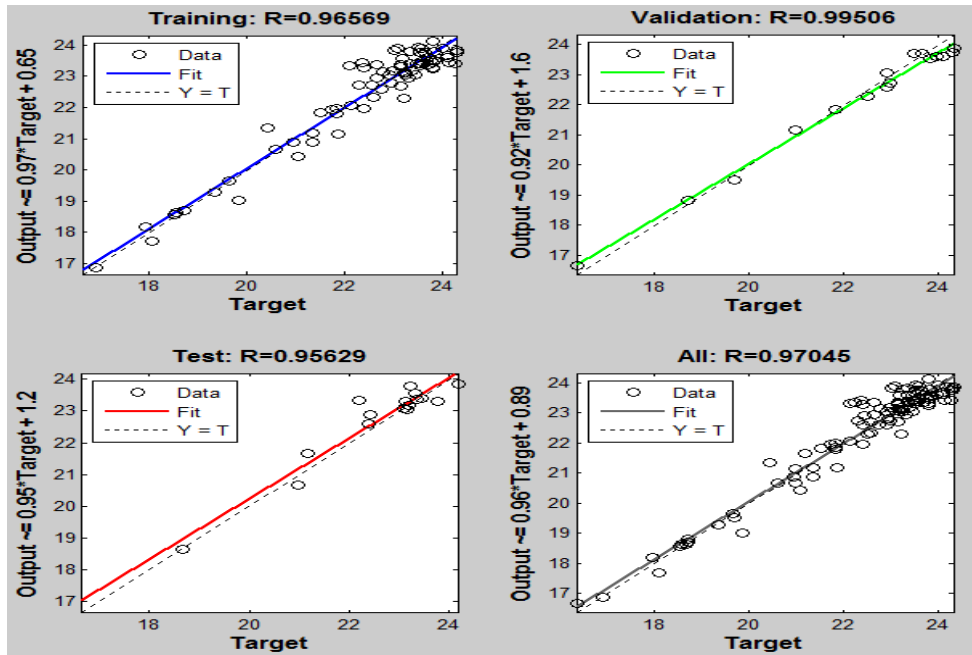


Figure V.2. Graphique de régression du tracé du FFBP

Le déplacement prédite du barrage par le modèle FFBP et représentées sur la figure V.3.

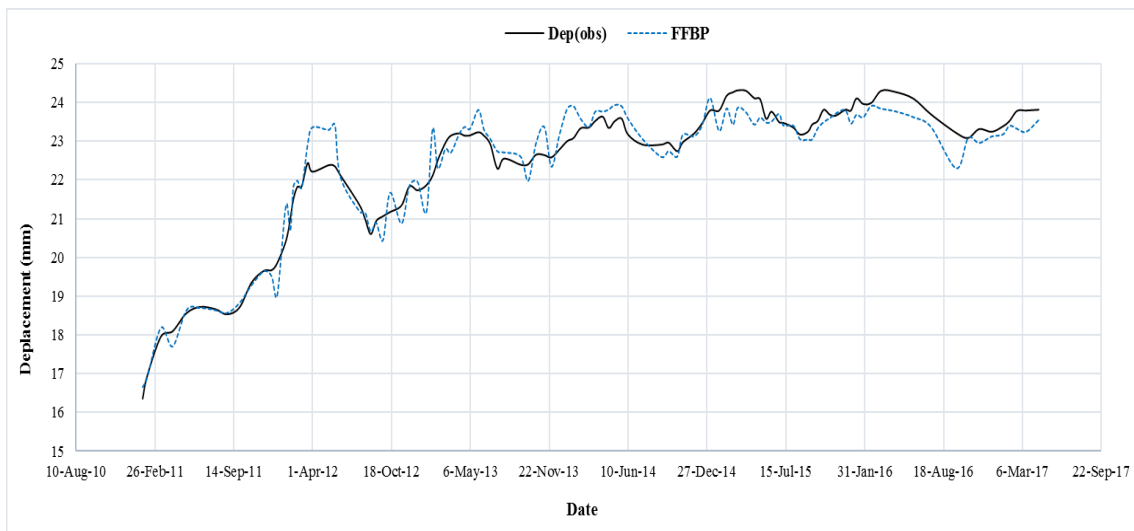


Figure V.3. Le déplacement prédit par modèle FFBP par rapport le déplacement mesuré (valeur cible).

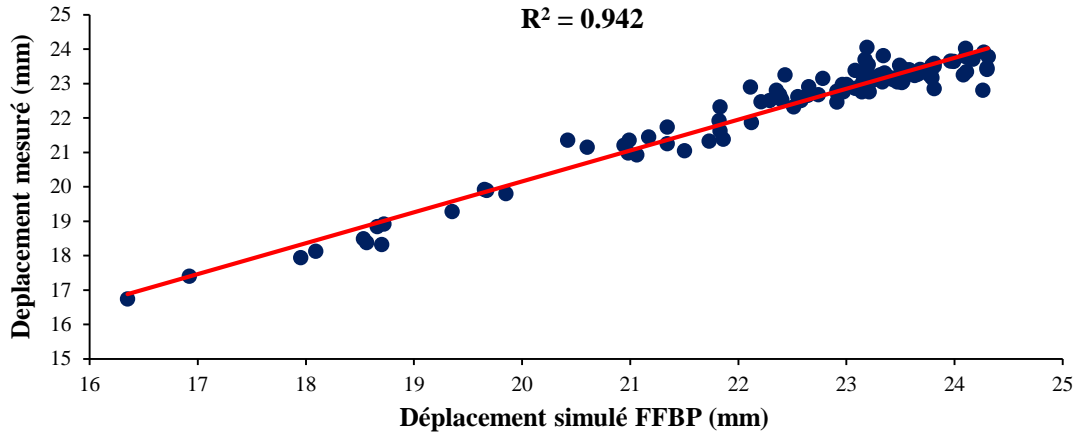


Figure V.4. Comparaison entre le déplacement mesuré et le déplacement simulé (FFBP)

V.4.2. Cascade_forward backpro (CFBP):

Les résultats du modèle CFBP montrent dans la phase de tous les données (All) l'Erreur Quadratique Moyenne et (RMSE) est de 0.345, L'efficacité de Nash Sutcliff (NSE) est de 0.964 et le Coefficient de détermination (R^2) est de 0.931.

Selon les critères d'évaluation statistiques appliqués, nous avons observé que le modèle FFBP avait une très bonne capacité prédictive en termes de comparaison des coefficients de détermination (R^2) et de Nash (NSE) élevés et un RMSE plus bas que le modèle CFBP.

La figure suivante montre les diagrammes de l'apprentissage, validation et de test de l'algorithme CFBP.

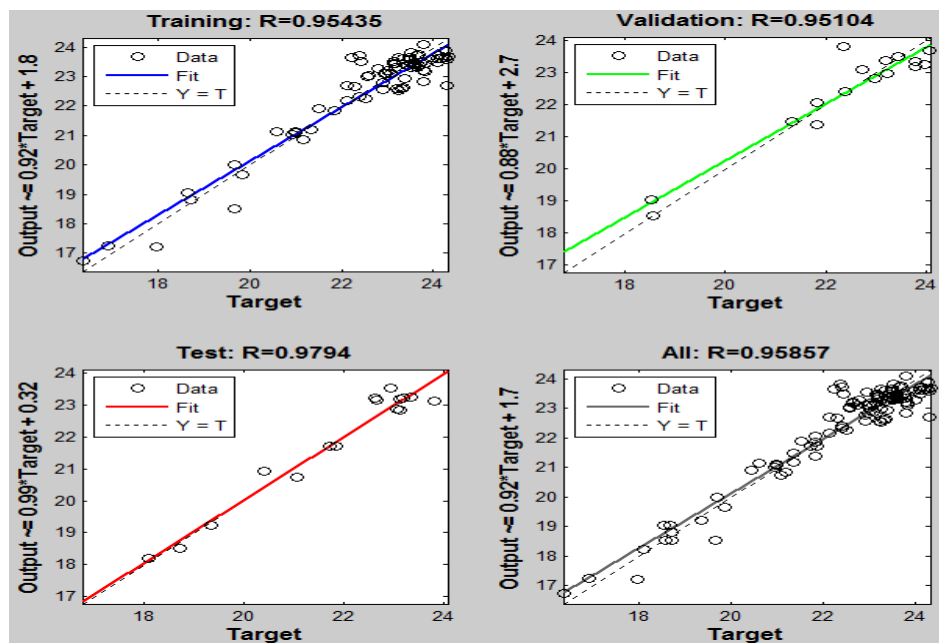


Figure V.5. Graphique de régression du tracé du CFBP

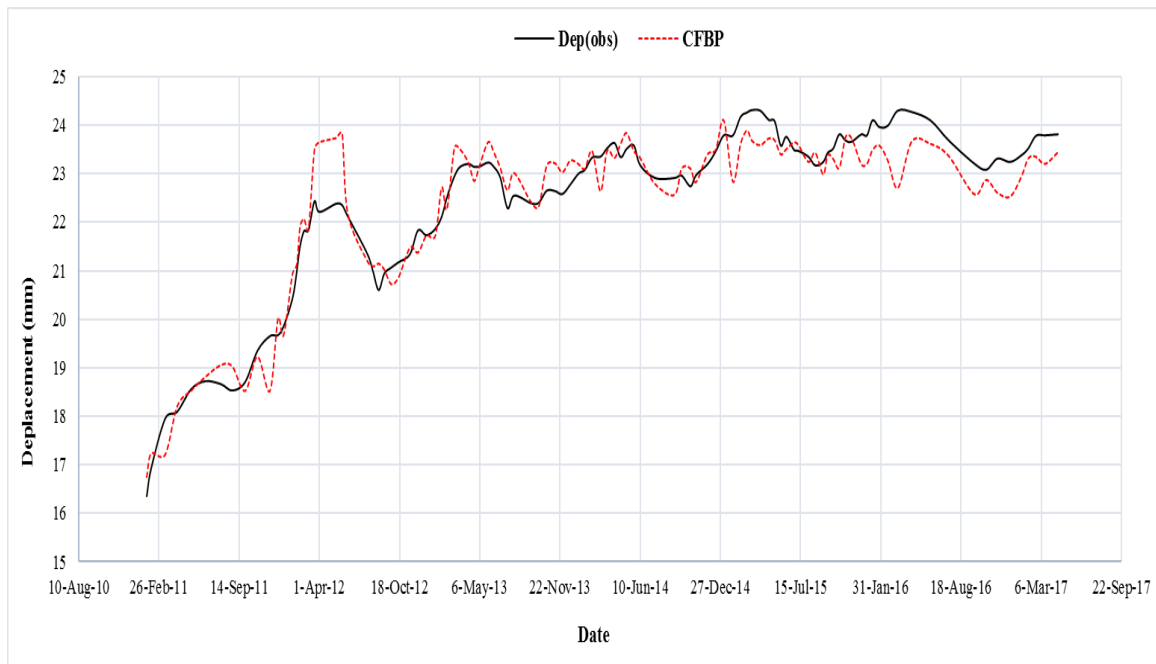


Figure V.6. Le déplacement prédit par le modèle CFBP par rapport le déplacement mesuré (valeur cible).

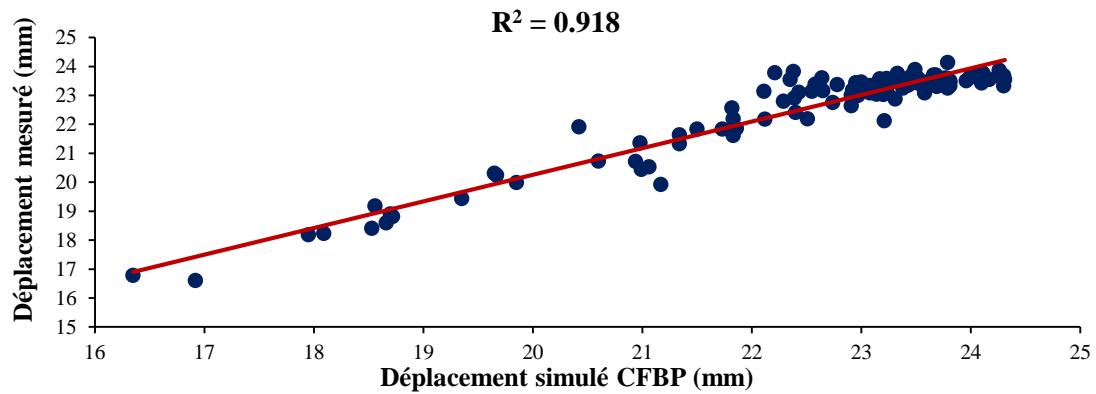


Figure V.7. Comparaison entre le déplacement mesuré et le déplacement simulé (CFBP)

Les résultats obtenus dans ce travail sont mentionnés dans le tableau ci-après.

Tableau V.1. Performances de la prédiction (FFBP, CFBP)

modèles	RMSE	NSE	R ²
FFBP	0.405	0.941	0.942
CFBP	0.495	0.918	0.918

La figure V.9 présente une comparaison graphique entre le déplacement prédit par les modèles FFBP et CFBP par rapport le déplacement mesuré (valeur cible).

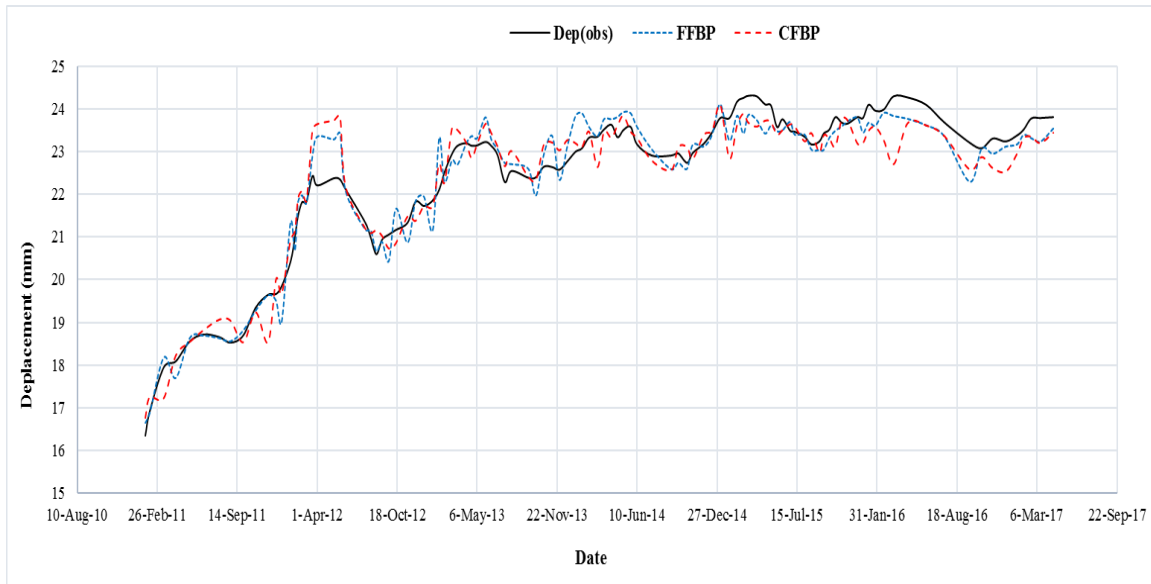


Figure V.8. Le déplacement prédit par les modèle FFBP et CFBP par rapport le déplacement mesuré (valeur cible).

Conclusion :

Les RNA ont été employés avec succès pour modéliser les rapports non linéaires complexes de séries chronologiques d'entrée-sortie dans une large variété de domaines.

Cette étude est menée pour établir la corrélation entre les facteurs climatiques et le déplacement de barrage de Beni Haroun. Ici, le déplacement du barrage est projeté par deux algorithmes, FFBP et CFBP, via sept entrées différentes. L'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2) ont été utilisés pour évaluer l'efficacité des modèles.

Les résultats indiquent que la performance du modèle FFBP est meilleure que celle du modèle CFBP.

Conclusion générale :

Les barrages sont des infrastructures complexes et essentielles pour la gestion de l'eau et la production d'énergie. Cependant, en raison de leur taille et de leur importance, ils doivent être constamment surveillés pour détecter tout signe de défaillance potentielle. Les systèmes d'auscultation jouent un rôle crucial dans cette surveillance continue, en fournissant des données précieuses sur le comportement des barrages.

Les systèmes d'auscultation permettent de collecter des informations en temps réel sur les différentes variables qui influent sur la stabilité des barrages, telles que les déformations, les contraintes, les niveaux d'eau et les vibrations. Ces données sont analysées pour détecter les variations anormales et les comportements potentiellement dangereux. Grâce à cette surveillance constante, les ingénieurs peuvent prendre des mesures préventives et réactives pour maintenir la sécurité et l'efficacité des barrages.

Notre travail porte sur l'analyse des mesures d'auscultation au niveau du barrage de Beni Haroun. Ce dernier situé sur l'oued El Kebîr dans la wilaya de Mila (Est-Algérien). La géologie locale s'inscrit dans un contexte tectonique complexe de chevauchements et de failles ou décrochements, caractérisé par des déformations plastiques (plissements) et cassantes (failles, fractures) des unités lithologiques du site.

Sur le plan climatique, le site d'étude situé dans un climat humide, caractérisé par une saison sèche s'étendant de Juin à Octobre et une saison humide occupe le reste de l'année.

L'analyse de la piézométrie montre que les observations piézométriques en rive gauche du barrage montrent que la perméabilité de ces calcaires est anisotrope, elle est plus élevée parallèlement que transversalement aux couches, impliquant des circulations parallèle à la stratification. La sous pression du barrage est plus développé en rive gauche qu'en rive droite.

L'étude de la température révèle qu'elle présente une variation sinusoïdale dans les zones localisées à la surface, avec une différence importante entre les valeurs maximales et minimales. En revanche, dans les zones en profondeur du béton, cette différence diminue et la fluctuation tend à se stabiliser.

La méthode d'analyse des données d'auscultation par réseau de neurones offre une approche innovante pour l'interprétation des données collectées, capables d'apprendre à partir d'un ensemble de données et de faire des prédictions. En utilisant cette méthode, on peut extraire des informations précieuses à partir des données d'auscultation, identifier les schémas, détecter les anomalies et prendre des décisions éclairées concernant la sécurité et la maintenance du barrage.

Pour prédire le déplacement dans barrage de Beni Haroun, deux algorithmes, FFBP et CFBP, ont été utilisés, en utilisant sept variables différentes. L'efficacité des modèles a été évaluée en utilisant des mesures telles que le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE). Les résultats indiquent que la performance du modèle FFBP est meilleure que celle du modèle CFBP.

En fin, on peut dire que l'automatisation et la supervision des systèmes d'auscultation est une solution importante qui permet de minimiser les risques des ruptures des barrages et rendre l'équipe chargée d'auscultation plus aise en minimisant leurs déplacements dans les moments et lieux difficiles du barrage.

*Références
Bibliographique*

Références bibliographiques :

- [1] Bouaicha. A (2013). Simulation numérique de l'effet de tremblement de terre sur les barrages en terre. Mémoire de Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Génie civil Université de Mohamed Khider – Biskra.
- [2] CFBR(2012). Comité français des barrages et réservoirs CFBR. (2012). Groupe de travail calcul des barrages poids, Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids propositions et recommandations.
- [3] Carrère.A (2000).Bureau d'Ingénieurs Conseils Coyne et Bellier, Techniques de l'ingénieur.
- [4] Carrère (2001).Conception des barrages-voûtes. Colloque Technique mai 2001 ducf gb, Aix-en-Provence.
- [5] Rolley(1989).Rolley.R. Dir. (1989). Technique des barrages en aménagement rural.
- [6] ESHA(2005).ESHA. (2005). Petite hydroélectricité : guide technique pour la réalisation de projet.
- [7] Moulay Elboudkhili(2014).Moulay Elboudkhili A. (2014). Étude paramétrée de la stabilité des barrages poids. Département de génie civil. Université Abou bekrbelkaid, Tlemcen, Algérie.
- [8] MAF(1977), Belhaddad. H (2018).Modélisation des écoulements à travers la digue du barrage Ain Zada. Université de Mohamed Boudiaf - m'sila.
- [9] Gahlouz. M (2020).Analyse et interprétation des données d'auscultation des barrages par le modèle HST. Université Mouloud MAMMERY - TIZI OUZOU.
- [10] Buron, A.Meilhak (1995).Cours sur les barrages.
- [11] Marouf. H.R, Allemoumhani. W(2020). Analyse des paramètres d'influence sur la stabilité des barrages poids Cas du barrage de Béni Haroun, Wilaya de Mila. Université aboubakrbelkaïd– Tlemcen.

[12] Bakroune. M (2011). Analyse dynamique d'un barrage en béton compacté au rouleau (B.C.R) sous charge sismique, Mémoire de magister en hydraulique, université Hadj Lakhdar Batna.

[13] Rouissat.B (2013/2014). Cours ouvrages hydrauliques, département d'hydraulique, université Abou-bekrbelkaid, Tlemcen.

[14] Schleis et Pougatsch(2011). Les barrages du projet à la mise en service. Presses polytechniques et universitaire romandes.

[15] Degoutte(2002). Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Cemagref éditions.

[16] Les ruptures des barrages(2004). Les ruptures des barrages, Ministère de l'écologie et du développement durable, France, 2004.

[17] Le delliou (2003). les barrages, conception et maintenance, E.N.T.P.E presses universitaire de Lyon, 2003.

[18] Habitouche. a(2020) Modalisation de l'effet de l'infiltration sur la stabilité d'un barrage en terre situé à Magra. université mohamed el-bachir el-ibrahimi Bordj Bou Arreridj.

[19] Belhaddad. H(2018). Thèse doctorat, modélisation des écoulements à travers la digue du barrage Ain Zada, université mohamed boudiaf - m'sila.

[20] Carrière, a(1994). Barrages, traité construction, p 2-24.

[21] Anton j. Schleis et Henri Pougatsch ; les barrages du projet à la mise en service presses polytechnique et universitaires romandes ,933p.

[25] Hamaizia. d,(2021). Stabilité des barrages en terre et ouvrages d'auscultation ; cas du barrage en terre (géomembranes) d'Ourkiss. W. Oum el Bouaghi, Algérie. université Larbi Tébessi-Tébessa.

[26] Dra-91,(2012). Maîtrise des risques accidentels sur les ouvrages hydrauliques.

[27] Cigb. (1989). bulletin 68 - monitoring of dams and their foundations.cfbr. (2018). recommandations pour la justification du comportement des barrages - voûte. le delliou, p. (2003). les barrages : conception et maintenance. (p. u. de lyon, ed.).

[28] Mathilde de bigault de granrut, (2019). analyse et interprétation de la pression d'eau en fondation des barrages-voûtes à partir des mesures d'auscultation. mécanique des solides [physics.class-ph]. université grenoble alpes, français.

[29] Fabre, j. p., paul, r., and toulouse, m. (2014). "l'auscultation des grands barrages edf abstract : " congrès diagnobéton, toulouse, 1–7. poupart, m., and royet, p. (2001). "la surveillance des barrages." colloque technique cfgb, 1–47

[30] Dimenc, (2014).fiche drm « le risque rupture de barrage ».

[31] P. royet,(2006). guide pratique (surveillance et entretien des petits barrages).

[32] Géovanni lombardi, (1993). barrages en béton « détection et solution de problèmes ». Conférence, Locarno-Minusio (Suisse) ,20 Octobre 1993

[33] Le.delliou, (2007). les barrages conception et maintenance, presses universitaires, lyon.

[34] Tecsalt, (2004). exploitation, surveillance et maintenance du barrage ain youcef,cahier d'instruction.

[35] Dibiagio.e, (2000).monitoring of dams and theirfoudations. auscultation des barrages et leurs fondations, xxe congrès cigb, rapport général question 78, beijing, volume iii, p 1459 – 1545.

[36] Antoine et al, (1992). Antoine F., Josseume H., Levillain J.P., Rouas G. (1992).
Recommandations sur les barrages-réservoirs d'alimentation des canaux à Bief de partage.
STC.PMVN. Expertise, surveillance, entretien et confortement.

[37] Boukhtouche. k, agrouche. m. (2016).automatisation et supervision
centralisée du réseau d'auscultation du barrage taksebt.université mouloud mammeri -
tizi ouzou.

[38] Boughari. y, (2016). modélisation par la méthode des éléments finis de la déformation
d'un barrage. mémoire de fin d'étude, centre des techniques spatiales.

[39] Hamriche. h, (2013).etude de l'évolution de certaines grandeurs physiques d'un barrage
en terre (cas du barrage de koudietmedaouar).université hadj lakhdar –batna.

[40] Boneli, (2007). analyse retard des mesures d'une auscultation de barrages.

[41] Chouinard and Roy, 2006, Bonelli et al., 2004, Leger and Seydou,
(2009). PERFORMANCE OF STATISTICAL MODELS FOR DAM MONITORING DATA.
Joint International Conference on Computing and decisionmaking in Civil and Building
Engineering. Montréal

[42] Boumaïza, (2010). boumaïza.m,(2010).contribution a l'étude et à l'analyse du
comportement des barrages en terre et de leur stabilité. magister,université m'hamed bougara
de boumerdès.

[43] Massiéra.m, szostakchrzanowski.a, bazanowski.m, withaker.
c, janelle & vautour ,(2008). analyse des déformations de grands barrages en remblai pendant
le remplissage et l'opération du réservoir. congrès annuel scgc. québec,qc.

[44] Szostak-chrzanowski et al. 2005, szostack-chrzanowski et al. (2008).use of deformation
monitoring results in solving geotechnical problems—case studies. engineering geology.

[45] CSB, (2003).analysemethoden für die vorhersage und kontrolle des verhaltens von talsperren. Comité suisse des barrages.

[46] Alexandre, g, simon, maxime, j., royer, florian, j., mauris, jean-paul, fabre .innovation et auscultation – analyse des mesures d'auscultation des barrages avec les réseaux de neurones

[47] OFEG. (2002). office fédérale des eaux et de la géologie suisse. sécurité des ouvrages d'accumulation, documentation de base relative à la sécurité structurale, version 1.

[49] Boulaiche m. & arous a., (2015). influence des eaux du barrage de béni haroun sur l'hydro-système hivernaux, mem. master, université de constantine, algérie, 192p.

[50] Kerdoud s., (2006). le bassin versant de beni haroun eau et pollution, mémoire magister, université mentouri, constantine, 169p.

[51] ANBT (agence nationale des barrages et transferts, mila), (2002). barrage de béni haroun sur l'oued kebir, monographie, volume1, tractebel engineering division hydraulique, 363p.

[52] Mebarki. a., 2009. ressource en eau et aménagement en algérie : les bassins hydrographiques de l'est, office des publications universitaires (opu), alger, 389p.

[53] Teffaha s. & kihal k., 2016. contribution à l'étude des impacts du barrage de béni haroun sur le plan climatique et hydrologique de la région de mila, mémoire master, centre universitaire mila, 131p.

[54] Khaldi f- z., melghit. m. 2007 qualité physico-chimique, pollution organique et contamination métallique (fe, cu, mn et zn) des eaux des barrages hammam grouz, béni haroun et de l'oued rhumel mémoire ingénieur d'état en ecologie : pathologie des écosystèmes. université mentouri- constantine.

[55] Belaidi c., mecheri h- a (2009) evaluation du niveau de contamination par les éléments traces métalliques (cr, cd, et pb) du compartiment sédimentaire de l'oued rhumel (de l'amont

de belaa jusqu'à l'amont du barrage béni haroun) mémoire ingénieur d'état en ecologie et environnement : pathologie des écosystèmes.université mentouri- constantine.

[56] Habila.s (2008) etude de l'impact du barrage béni haroun sur l'environnement : effets ecotoxicologiques mémoire de magister en biologie : ecotoxicologie. université de jijel.

[57] K.barkat (2016).suivi de la qualité physico-chimique des eaux du barrage béni haroun.université des frères mentouri constantine.

[59] Hafsi. b(2016).le transport solide et la qualité des eaux du barrage beni-haroun et leur impacts sur l'environnement. université larbi ben m'hidi– oum el bouaghi.

[60] Gouaidia l., (2008) ; influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de meskiana nord-est algérien, université badji mokhtar, annaba. 29p.

[61] Bentlia r.bouzeraa. n(2017). apport de sig à la cartographie des zones à risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de beni haroun. mila. algérie. centre universitaire abdelhafid boussouf – mila.

[62] Lakache.h (2022). etude de la variabilité des apports hydrologiques des oueds rhumel-endja au barrage béni haroun (algérie orientale). enjeux du climat et de l'environnement. thèse de doctorat. universite freres mentouri constantine 1.

[63] ANB (agence nationale des barrages, mila), 2002. barrage de béni haroun sur l'oued kabâr, monographie, volume1, tractable engineering division hydraulique.

[64] Khaldi f- z, melghit m (2007) .qualité physico-chimique, pollution organique et contamination métallique (fe, cu, mn et zn) des eaux des barrages hammam grouz , béni haroun et de l'oued rhumel mémoire ingénieur d'état en ecologie : pathologie des écosystèmes. université mentouri- constantine.

[65] Chebbah .l, kabour .a.(2018). impact de la retenue d'un barrage sur le régime climatique local : cas de béni haroun (est algérien) geo-eco-trop, 2018, 42, 1: 173-186 .

- [66] Gouvenot d., clerdouet d. et al. 1997, barrages & réservoirs n°7, l'érosion interne.
- [67] Harza engineering company. (1984), etude technico-économique conduisant au choix du site. novembre, vol. 3, annexe b- géologie.
- [69] Labadi.a & achour.s : apport de l'analyse piezometrique dans l'étude des fuites du barrage voute a assises calcaires de *foum el gherza, biskra, algerie* : courrier di savoir, n°11, mars 2011, pp.25-32.
- [70] Amberg, f. (2009). interpretative models for concrete dam displacements. dans : xxiiiith international congress on large dams, brasilia
- [71] ANBT (1999): rapport de synthèse, transfert de beni haroun. tractebel, ingénierie, volume 1. alger.
- [72] ANBT (2007) rapport final de la campagne géophysique, barrage de beni haroun (wilaya de mila, algérie).
- [73] Benchabane. N I (2015) : relation barrage-nappes. etude de cas barrage de beni haroun. wilaya de mila. mémoire de magister. université de constantine.
- [74] Chebbah.L : 2020 : l'utilisation du béton bitumineux dans les travaux hydrauliques : étanchéité des barrages en remblai. thèse doctorat en science. université de biskra
- [75] Chebbah. L et Kabour. A (2023): characterization of leakage water flows in the subsoil of beni haroun dam by hydrogeological approach. acta hydrologica slovacica. volume 24, no. 1, 2023, 14 – 23.
- [76] Garvey e.b. (1997), "on-line quality control of injection molding using neural networks. minor thesis department of computer science, royal melbourne institute of technology, melbourne, australia, 82 pages.
- [77] brakni.EL(2011) réseaux de neurones artificiels appliqués à la méthode électromagnétique transitoire infiniem , mémoire présenté à l'université du québec à chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie p11.

- [78] Sandeep samantaray • dillip k. ghose. (2019) assessment of suspended sediment load with neural networks in arid watershed. the institution of engineers (india) 2020.
- [79] Li, b., yang, j., & hu, d. (2020). dam monitoring data analysis methods: a literature review. structural control and health monitoring, 27(3), e2501.
- [80] Gahlouz, m., gourine, b., & smail, g. a. b. i. (2021). analyse des mesures pendulaires d'auscultation par le modèle hst et interprétation des résultats; cas du barrage béni haroun: analysis of the pendular measurements of auscultation by the hst model and interpretation of the results; case of the beni haroun dam. revue nature et technologie, 13(02), 01-13.
- [81] De granrut, m., simon, a., & dias, d. (2019). artificial neural networks for the interpretation of piezometric levels at the rock-concrete interface of arch dams. engineering structures, 178, 616-634.
- [82] Hu j, ma f (2020). zoned deformation prediction model for super high arch dams using hierarchical clustering and panel data. eng comput 37(9):2999–3021
- [83] Hu, j., & ma, f. (2021). comparison of hierarchical clustering based deformation prediction models for high arch dams during the initial operation period. journal of civil structural health monitoring, 11, 897-914.
- [84] Abiodun, o. i., jantan, a., omolara, a. e., dada, k. v., mohamed, n. a., & arshad, h. (2018). state-of-the-art in artificial neural network applications: a survey. heliyon, 4(11), e00938.
- [85] Niu, z., zhou, m., wang, l., gao, x., & hua, g. (2016). ordinal regression with multiple output cnn for age estimation. in proceedings of the ieee conference on computer vision and pattern recognition (pp. 4920-4928).
- [86] Lippmann, R. (1987). an introduction to computing with neural nets. ieee assp magazine, 4(2), 4-22.

[87] Samantaray, s., & ghose, d. k. (2020). assessment of suspended sediment load with neural networks in arid watershed. journal of the institution of engineers (india): series a, 101, 371-380.

[88] Kacimi aymen issam eddine et medjdoubi aymen (2022). le deep learning et la bioinformtique pour analyser la degradation du vaccin covid-19 a arnm.

[89] Moriasi, d. n., arnold, j. g., liew, m. w. van, bingner, r. l., harmel, r. d., and veith, t. l. (2007). hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria', transactions of the asabe., 58(6), 1763–1785.

Sitegraphie :

[22] <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.htmlid=898> (consulté en Mai 2019).

[23] <http://www.planete-tp.com/barrages-en-remblai-a122.html> (consulté en Mai 2019).

[24] (www.aappma-bugeat.e-monsite.com, www.patrimoines.laregion.fr, www.france3-regions.francetvinfo.fr)

[48] <https://www.sisgeo.com/fr/produits/pendules/item/pendules-directs-et-inverses.html>.(consulté en Mai 2019).

[68] <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>