

Département des Sciences de la Terre

Licence en Sciences et Techniques Eau & Environnement

Mémoire de projet de fin d'étude

LA CARACTÉRISATION HYDROCHIMIQUE DES EAUX DE BARRAGE HASSAN II (HAUTE MOULOÛYA, MAROC)

Réalisé par : REDOUANE Mariem
& NAJEM Ibtissam

Soutenu le : 1 Juillet 2021

Devant la commission d'examen composée de :

Encadrant: Pr. Ali RHOUJJATI, FST Marrakech

Examinatrice : Pr. Yamina BOURGEOINI, FST Marrakech

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

Tout d'abord à Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné de la force et le pouvoir d'arriver à terminer ce travail.

Au terme de ce mémoire de fin d'étude, nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements pour toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à sa réalisation.

A Mr **Rhoujjati Ali** de nous avoir encadré tout le long de réalisation de ce mémoire, de son soutien, son encadrement et son guide au bon chemin avec son aide scientifiques, administratif, ces conseils et la patience pour faire tous les corrections.

A Mlle **OudchairaSoukainan** notre Co-encadrante. Pour tous les conseils, les guides et pour sa présence quotidienne pour répondre à toutes types de questions nous expriment notre profonde gratitude.

A Notre professeur et frère, **Redouane El houssine**, professeur de sciences de la vie et de la terre au lycée EL KHAOUARIZMI, nous tenons nos sincères remerciements pour tous vos efforts pour nous voir dans des meilleures situations.

Aux **membres de jury** qui ont daigné laisser leurs multiples occupation pour se donner la peine d'examiner ce travail, leurs critique et suggestions contribueront certainement à rehausser la valeur scientifique de ce travail.

Enfin, nos vifs remerciements s'adressent à nos parents, nos familles, nos amies. Merci d'avoir cru en nous et nous avoir toujours soutenu durant les moments difficiles.

Nos responsables, Nos professeurs, Nos enseignants et tous les cadres de la Faculté des sciences et techniques. Merci pour vos aides durant toutes ces années d'études.

DEDICACE

A nos mères Aicha et Zaina

A nos pères Abdlilah et Lahcen

A nos frères et nos sœurs

A tous nos amis

Nous dédions ce travail

RESUME

Situé à l'Est du Maroc, le bassin de la Moulouya est l'un des plus grands réseaux hydrauliques du pays. Le barrage Hassan II de points de vue capacité est parmi les plus grands retenue d'eau incluse dans ce bassin, il a comme vocations principales : l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la protection des zones et barrages situés en aval contre les inondations et l'envasement.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les caractéristiques hydrochimiques des eaux du barrage Hassan II pour avoir une idée sur sa qualité et pour évaluer l'impact des résidus miniers et la contamination de ces eaux par les éléments traces métallique (ETM) par la mine abandonnée Zeïda.

Mots clé : Bassin de la Moulouya, barrage Hassan II, envasement, éléments traces métallique (ETM), mine Zeïda.

Liste des tableaux

<u>Tableau 1 : Taux de réalisation des barrages au Maroc (Ministère de l'équipement, du transport de la logistique et de l'eau, 2019)</u>	7
<u>Tableau 2 : Comparaison de la Situation journalière des principaux grands Barrages au Maroc</u>	8
<u>Tableau 3 : : Caractéristiques des barrages sur oued Moulouya (badraoui, (2001), kettani et al, (1995), lahlou(1982), nahon et al.,(2008))</u>	8
<u>Tableau 4 : Localisation des stations selon les coordonnées</u>	20
<u>Tableau 5 : Représentation des résultats des analyses chimiques</u>	25
<u>Tableau 6 : Représentation des résultats de calculs de la balance ionique.</u>	26
<u>Tableau 7 : Matrice de corrélation des paramètres chimiques analysés des eaux de Barrage Hassan II</u>	32
<u>Tableau 8 : Axes F1, F2, F3 et F4 retenus, leurs valeurs propres et pourcentages cumulés en %</u>	32
<u>Tableau 9 : Corrélation entre les variables et les facteurs</u>	34
<u>Tableau 10 : Contribution des variables en %</u>	34
<u>Tableau 11 : Représentation des résultats de calcul de SAR</u>	38

Liste des figures

Figure 1: Schéma du Barrage voûte.....	13
Figure 2 : Exemple du barrage voûte au Maroc (Barrage Bin el Ouidane, province d'Azilal).....	13
Figure 3: barrage poids	1
Figure 4: Exemple du barrage poids (Barrage al Massira)	1
Figure 5 : Barrage à contreforts	1
Figure 6 : Différents types de barrages à contreforts.....	1
Figure 7 : Barrage en terre homogène	2
8 : Exemple de barrage en terre Homogène au Maroc (Barrage Youssef Ben Tachfin, province de Tiznit)	2
Figure 9 : Barrage en terre a noyau central.....	2
Figure 10 : Barrage à masque amont	3
Figure 11 : Barrage en enrochement.....	3
Figure 12 : Evolution du nombre de barrages construits au Maroc.....	7
Figure 13 : Développement de la capacité des barrages.....	7
Figure 14 : Image satellite du barrage Hassan II (Google Earth)	9
Figure 15 : Situation géographique du bassin versant de la Moulouya.....	12
Figure 16 : Bassin versant et géologie de la Moulouya (Bou abdallâh et Larue, 2009).....	13
Figure 17 : Log stratigraphique synthétique de la Haute Moulouya et ses bordures atlasiques (NAJI, 2004).....	16
Figure 18 : Le réseau hydrographique de la haute Moulouya réalisé à base d'MNT (Elazhari, 2013).....	17
Figure 19 : Localisation des stations d'échantillonnage au niveau de barrage Hassan II (Google Earth).....	19
Figure 20 : Analyseur multi paramètre utiliser pour les mesures in-situ (.clarkson laboratory).....	21
Figure 21 : Titration Des carbonates et des bicarbonates (Photo personnel).....	22
Figure 22 : Titration Des Chlorures (Photo personnel)	22
Figure 23 : Spectrophotomètre (Photo personnelle).....	23
Figure 24 : Spectrophotomètre portable (Photo personnelle).....	23
Figure 25 : Spectrophotomètre à flamme (Photo personnelle).....	24
Figure 26 : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME (Capture personnelle)	27
Figure 27 : Projection des eaux de Barrage Hassan II sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff.....	28
Figure 28 : Projection des eaux de Barrage Hassan II sur le diagramme de Piper.....	29
Figure 29 : Projection des eaux de Barrage Hassan II dans le diagramme de Gibbs	30
Figure 30 : Interface de commande du logiciel R.....	31
Figure 31 : Interface de commande du logiciel XLSTAT.....	31
Figure 32 : Représentation graphique des variables en % sur le plan F1 et F2 (a) et sur le plan F2 et F3 (b).....	33
Figure 33 : Projection des variables et des individus dans le plan factoriel F1-F2	35
Figure 34 : les normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine... ..	36

Tale des matières

I : INTRODUCTION :	11
II : GENERALITES SUR LES BARRAGES :	12
II.1 : Définition d'un barrage :	12
II.2 : Types des barrages :	13
II.2.1 : Types de matériaux :	13
II.2.2 : Critère de taille :	3
II.3 : Rôles d'un barrage :	4
II.3.1 : La politique de l'eau :	4
II.3.2 : Politique agricole :	4
II.3.3 : Politique énergétique :	4
II.3.4 : Politique des rivières et la maîtrise du territoire :	5
II.3.5 : Politique de l'environnement :	5
II.4 : Envasement des barrages :	5
III : Caractéristiques du barrage Hassan II :	6
III.1 : Politiques de barrages à l'échelle du royaume :	6
III.2 : Edification du barrage Hassan II :	8
III.2.1 : Généralité sur le barrage Hassan II :	9
III.2.2 : Les caractéristiques générales du barrage Hassan II :	9
III.2.3 : Rôle du barrage Hassan II :	10
III.2.4 : l'envasement du barrage :	10
III.3 : Aperçu sur les travaux antérieurs :	11
IV : Description de site d'étude :	11
IV.1 : Situation géographique :	11
IV.2 : Cadre géologique du bassin Moulouya :	12
IV.2.1 : Socle :	13
IV.2.2 : Couverture :	13
IV.2.3 : Formation mésozoïque :	13
IV.2.3.1 : Le permo-trias :	13
IV.2.3.2 : Trias :	14
IV.2.3.3 : Jurassique :	14
IV.2.3.4 : Le Crétacé (cénomaniens) :	15
IV.2.4 : La formation cénozoïque :	15
IV.2.4.1 : Le tertiaire :	15
IV.2.4.2 : Le quaternaire :	15
IV.3 : Cadre climatique de la Moulouya :	16
IV.4 : Cadre hydrologique :	17
V : APPOTS DE CHIMIE DE LA MOLCULE D'EAU :	19
V.1 : Méthodologie :	19

V.1.1 : Echantillonnage et mesures in-situ :	19
VI : Résultats des analyses et discussions :	24
VI.1 : Qualité des analyses chimiques estimée à l'aide la balance ionique (BI) :	25
VI.2 : Projection des eaux sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff :	27
VI.3 : Projection des analyses sur le diagramme de Piper	28
VI.4 : Classification des eaux selon les faciès chimiques :	29
VI.5 : Minéralisation des eaux :	29
VI.6 : Traitement des données par l'utilisation de l'analyse en composante principale :	30
VI.7 : Qualité chimique des eaux :	36
VI.7.1 : Qualité de l'eau destinée à la consommation humaine :	36
VI.7.2 : Qualité de l'eau destinée à l'irrigation :	37

I : INTRODUCTION :

La position géographique particulière du Maroc lui confère une gamme remarquable de bioclimats allant de l'humide dans le Rif, le Moyen et le Haut Atlas au bioclimat désertique au sud du pays.

Il est considéré comme le pays d'Afrique du Nord le mieux pourvu en eaux continentales, compte tenu de la grande variabilité spatiale de son environnement physique (topographie, géologie, climat, côte marine, zones humides, etc.). Les eaux continentales en générale et notamment les barrages sont une source majeure d'eau potable et d'irrigation, d'énergie, d'aliments et de nombreux autres bénéfiques.

En effet, les ressources hydriques du Maroc en général sont simultanément limitées et soumises à des fortes pressions accompagnées d'une détérioration croissante de leur qualité. Cet état sensible risque d'être aggravé par les changements climatiques annoncés pour le Maroc dont les conséquences pourraient avoir des effets néfastes sur le potentiel en ressources en eau, tant du point de vue quantité que qualité (Chillasse et al., 2001).

Situé à l'Est du pays, le bassin de la Moulouya est caractérisé par un climat semi-aride à aride et des ressources en eau limitées constituant le facteur déterminant de son développement socio-économique. Ce bassin héberge cinq grands barrages, dont le barrage Hassan II qui fut mis en service en 2005.

Les eaux sortantes de la circonscription minière abandonnée de Zeïda sont évacuées sans traitement, dans les oueds, s'ajoute le processus naturel de l'érosion du sol ; en effet, toutes les terres du bassin versant de Moulouya présentent des risques d'érosion hydriques élevés ces deux phénomènes pourrait affecter négativement ce barrage (Chillasse et al., 2001).

Cette pollution d'origine naturelle et anthropique pourrait avoir pour conséquence l'accélération du processus d'envasement au sein de la retenue.

En se basant sur les données bibliographiques disponibles, et sur les données collectées dans le terrain, le présent travail s'inscrit dans le cadre du projet de fin d'études en licence « Eau et Environnement ». Dans ce manuscrit, plusieurs points seront traités à savoir :

- Détermination du contexte scientifique général sur les barrages,

- Caractérisation et définition des principales valeurs et fonctions des barrages du Maroc,
- Définition de l'impact de la mine du Zeïda sur le barrage Hassan II.
- Contribution à la qualité chimique des eaux de barrage Hassan II.

Parmi ces points il en ressort un qui représente l'objectif principal de ce travail ; il s'agit de la caractérisation hydrachimique des eaux du barrage Hassan II en vue d'évaluer leur qualité chimique.

GENERALITES SUR LES BARRAGES :

I.1 : Définition d'un barrage :

Un barrage est un ouvrage de stockage destiné à retenir l'eau d'un fleuve ou d'une rivière par édification d'une barrière artificielle. Celle-ci a pour objectif également de contrôler le débit et la quantité d'eau à stocker (Azam, 2019).

I.2 : Type des barrages :

Au Maroc, on distingue plusieurs Types de barrages ; la classification se fait selon plusieurs critères notamment les matériaux de construction et la forme d'édification de la barrière.

I.2.1 : Types de matériaux :

Les barrages peuvent être classés en deux groupes :

- ❖ **Barrages rigides :** soit en béton ou en maçonnerie, or les barrages en béton se regroupent principalement en trois types :

- **Barrages voûtes :**

Ils sont constitués par une voûte simple ou à double courbure, nécessite une vallée plutôt étroite, disposant de versant très rigides capable de supporter le poids de l'eau parce qu'ils résistent à la poussée de l'eau par leur forme qui leur permet de répercuter la poussée hydrostatique sur la fondation par des arcs travaillant (Heragmi, 2009).

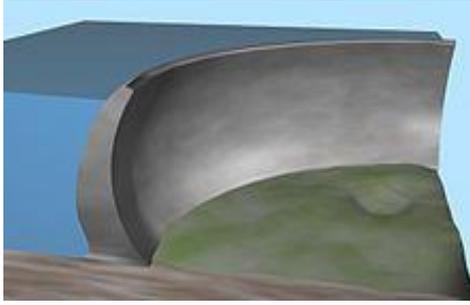


Figure 1: Schéma du Barrage voûte



Figure 2 : Exemple du barrage voûte au Maroc (Barrage Bin el Ouidane, province d'Azilal)

- **Barrages poids :**

Ce sont des structures très lourdes et massives dont la propre masse suffit à s'opposer à la pression exercée par l'eau. Ce sont des barrages souvent relativement épais ; leur profil est généralement triangulaire avec un parement amont vertical et un parement aval incliné.

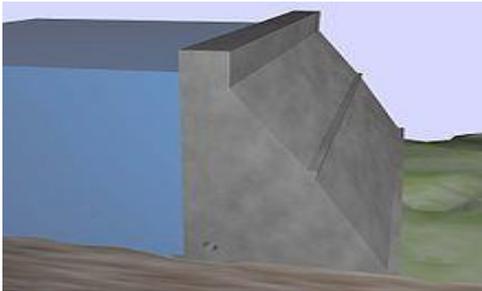


Figure 3: schéma du barrage poids



Figure 4: Exemple du barrage poids (Barrage al Massira)

- **Barrages à contreforts :**

Ils sont composés d'un voile en béton armé ou de voûtes semi-cylindriques à l'amont qui reporte la poussée de l'eau sur une série de mâtures ; les contreforts dressés parallèlement à la vallée destinés à reprendre la poussée de l'eau et à la transmettre à la fondation pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

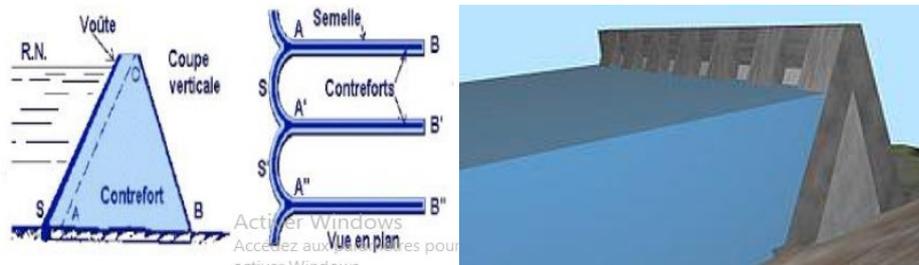


Figure 5 : Barrage à contreforts

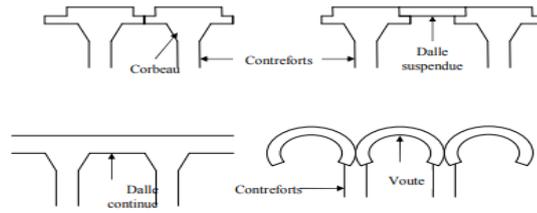


Figure 6 : Différents types de barrages à contreforts

❖ Barrages souples en terre ou en enrochements :

Les barrages souples sont classés en :

➤ Barrages en terre :

Les barrages en terre peuvent être constitués par des matériaux de caractéristiques diverses car le terme terre couvre une gamme de matériaux allant de l'argile pure très fin (après compactage on obtient des massifs étanches) à des éléments très grossiers (construction des massifs résistants aux forces de l'eau). Ces barrages en terre peuvent être considérés comme des barrages poids.

Il existe trois types principaux des barrages en terre : **Homogène, noyau, à masque amont.**

● Barrages homogènes :

Le barrage en terre homogène est constitué d'un massif en terre compactée imperméable muni d'un dispositif de drains dans sa partie aval et d'une protection mécanique contre l'effet du batillage dans sa partie amont (INRAE - UMR RECOVER - Equipe G2DR)



Figure 2 : Barrage en terre homogène

Figure 1 : Exemple de barrage en terre homogène au Maroc (Barrage Youssef Ben Tachfin, province de Tiznit)

- **Barrage à noyau :**

Les matériaux de construction disponibles sur place sont hétérogènes donc en ce faire face d'une digue hétérogène donc la seule solution adoptée consiste à concevoir un massif en plusieurs zones constituées chacune d'un matériau différent suivant la fonction qu'elle va assurer :

*La fonction d'étanchéité est assurée par un noyau étanche réalisé en matériau argileux qui pourra être placé en amont du barrage ou au centre de celui-ci,

*Le noyau étanche est maintenu par une ou plusieurs zones constituées de matériaux plus grossiers et relativement perméables, qui assureront la stabilité mécanique de l'ouvrage (Heragmi, 2009).

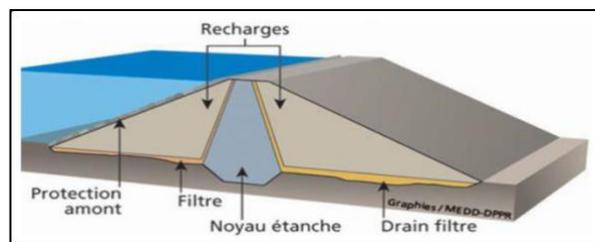


Figure 9 : Barrage en terre a noyau central.

- **Barrage a masque amont :**

Les barrages à masque amont sont constitués :

- D'un remblai plus ou moins perméable assurant la stabilité d'ensemble,
- D'une paroi imperméable (béton /ciment /bitume), appelé masque, placé sur le parement amont d'une façon à rendre le barrage étanche et lui permettre de retenir l'eau du réservoir.

La présence du masque en parement amont présente le double avantage de permettre des réparations en cas de dégradation du masque, mais aussi d'autoriser des vidanges de retenue très rapides (Heragmi, 2009).

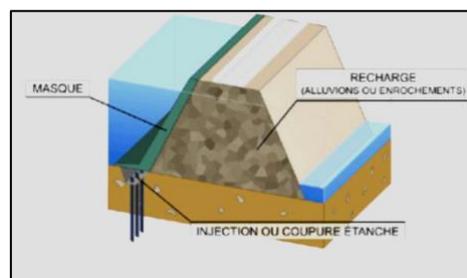
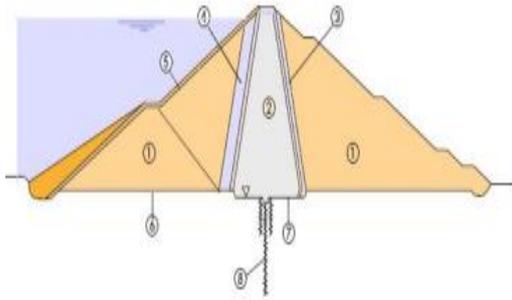


Figure 10 : Barrage à masque amont

➤ **Barrages en enrochement :**

C'est un grand tas de cailloux (enrochement) ; la fonction de résistance à la poussée de l'eau est assurée par le poids du tas. Le tas de cailloux n'est pas imperméable par lui-même, un organe d'étanchéité doit être mis en place soit en parement amont soit en noyau. Cet organe d'étanchéité peut être en amont ou interne, sa nature est variée.



Légende :

- 1) Enrochement, taille maximale 1000 mm
- 2) Noyau étanche en matériau limoneux et argileux
- 3) Filtres-drains en matériau grossier et en matériau fin, de 2,0 m chacun
- 4) Zone de transition, granulométrie maximale du matériau 150 mm
- 5) Rip-rap
- 6) Fondation en blocaille naturelle
- 7) Fondation sur terrain en place
- 8) Voile d'étanchéité

Figure 11 : Barrage en enrochement

I.2.2 : Critère de taille :

Les barrages sont classés en quatre catégories :

- ❖ Grands barrages : H (Hauteur) $> 60\text{m}$; V_s (volume de stockage) = 100 Mm^3 (million m^3),
- ❖ Barrages moyens : $25 < H < 60\text{m}$; $V_s = 60 \text{ Mm}^3$,
- ❖ Barrages collinaires : $15 < H < 25\text{m}$; $V_s = 2 \text{ Mm}^3$,
- ❖ Les lacs collinaires : $H < 15\text{m}$; $V_s = 50 \text{ 000m}^3$.

I.3 : Rôles d'un barrage :

Les barrages jouent divers rôles essentiels dans plusieurs politiques.

I.3.1 : La politique de l'eau :

L'objectif primaire de la construction de barrages est l'alimentation en eau potable. Un barrage constitue une réserve d'eau toujours disponible. Un atout majeur car dans la majorité du terroir du pays, les précipitations sont très inégalement réparties selon les saisons. Dans ce cadre, le Programme National pour l'Approvisionnement en Eau Potable et l'Irrigation (PNAEPI) 2020-2027 a été lancé le 13 Janvier 2020. Ce programme vise l'accélération des investissements dans le secteur de l'eau pour renforcer l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation et renforcer la résilience de notre pays face aux aléas et dérèglements climatiques.

I.3.2 : Politique agricole :

Les barrages peuvent aussi dans certains pays jouer un rôle important dans la politique agricole. Un nombre considérable de barrages ont été construits pour favoriser des processus d'irrigation et de bonification des terres. En revanche, l'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la productivité et permettre leur développement normal, en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides, donc l'irrigation devient plus en plus l'une des applications les plus courantes des barrages.

I.3.3 : Politique énergétique :

Les barrages servent très souvent, à fournir de l'électricité. Dans les pays où les barrages jouent ce rôle de producteur d'électricité, la question des barrages est une composante importante de la politique énergétique. En effet, l'hydroélectricité est une source d'énergie essentielle, propre et renouvelable. Son exploitation permet de réduire l'appel à d'autres sources énergétique plus polluantes ou non renouvelables.

La production de l'électricité à l'aide du barrage est assurée par la force de l'eau qui fait tourner une turbine pour fonctionner un alternateur présent à la sortie de la conduite dans la centrale. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. En fait la puissance de la centrale dépend effectivement de la hauteur de la chute et du débit de l'eau. Plus ils seront importants, plus cette puissance sera élevée.

I.3.4 : Politique des rivières et la maîtrise du territoire :

Dans un certain nombre de cas, les barrages ont aussi pour fonction de régulariser le cours des rivières. En réalité, le barrage retient l'écoulement naturel de l'eau. Ainsi de grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue pour régulariser l'écoulement des eaux et des rivières, sécuriser des personnes et réduire des dommages et pertes économiques, et atténuer les risques d'inondation sur le territoire.

I.3.5 : Politique de l'environnement :

Les barrages jouent souvent un rôle important dans la politique d'environnement. En perturbant les écosystèmes naturels, en s'attaquant à la biodiversité, en créant de nombreux nouveaux problèmes environnementaux (exemple : le dégagement de gaz de serre dû au pourrissement d'arbres dans l'eau).

I.4 : Envasement des barrages :

L'envasement est l'un des problèmes qui touche la retenue du barrage qui résulte principalement de l'érosion hydraulique qu'est une problématique particulièrement importante. Gouverné par des facteurs physiques naturels tels que l'agressivité climatique, la topographie, la lithologie et le couvert végétal surtout dans les zones caractérisées par des régimes pluviométriques irréguliers qui ont une influence considérable sur les pertes en sol, dans les zones méditerranéennes et semi-aride et notamment dans les zones montagneuses, les phénomènes d'érosion hydrique sont accentués par les fortes pentes et la couverture réduite du sol. Les barrages alimentés par ces zones subissent un envasement lié à une érosion importante (Tadrict et al, 2016)

Parmi les conséquences de l'envasement sur la retenue d'un barrage :

- la diminution de la capacité de stockage et les niveaux des services rendus par la retenue,
- Réduction du volume de la tranche réserve au laminage des crues donc l'augmentation du risque pour la sécurité de l'ouvrage,
- Affection sur la qualité des eaux de la retenue par la charge plus ou moins élevé des sédiments en ions (phosphore /manganèse/Azote, etc.) qui touche le chimisme de l'eau et la stratification thermique de la retenue (Badraoui et Hajji, 2001).

II : Caractéristiques du barrage Hassan II :

II.1 : Politiques de barrages à l'échelle du royaume :

Dès l'indépendance, et pour s'opposer aux apports pluviométriques généralement irréguliers et faibles, le Maroc a planifié par étapes une politique de gestion des ressources en eau pour doter le pays d'une importante infrastructure hydraulique, améliorer l'accès à l'eau potable, satisfaire les besoins des industries et du tourisme et le développement de l'irrigation à grande échelle. Cette politique est subdivisée en 3 phases :

- 1^{ère} phase (de 1925 à 1956) : est caractérisé par la construction de barrages à fortes potentialités en eau de surface pour faire face aux besoins de centres urbains en eau potable et pour assurer la production d'énergie. Cette phase est achevée par la construction de 13 barrages,
- 2^{ème} phase (de 1956 à 1966) : nommée aussi une phase de transition, est spécifiée par une évaluation des ressources disponibles et la définition des objectifs et la construction de 3 barrages seulement,

- 3^{ème} phase : En 1967, le feu Sa majesté le roi Hassan II a donné une nouvelle impulsion à la politique des barrages pour notamment l'irrigation d'un million d'hectare à l'horizon 2000, politique poursuivie par SM le roi Mohamed VI avec la réalisation de 2 à 3 grands barrages par an. En effet cette planification à long terme a permis aux décideurs d'anticiper le manque d'eau en donnant aux décideurs une optique à long terme (Ghomari, 2015).

Actuellement, le Maroc dispose de plus de 145 grands barrages et compte poursuivre cette politique avec la construction de nouveaux barrages pour subvenir aux besoins croissants en eau de sa population et de son économie (Figure 12). En effet la capacité actuelle de stockage est évaluée à 18,67 milliards de m³ (Figure 13), cette capacité de stockage augmentera à 22 milliards de m³ avec la construction en cours de 18 barrages (Tableau 1) (Direction générale de l'eau, 2019).

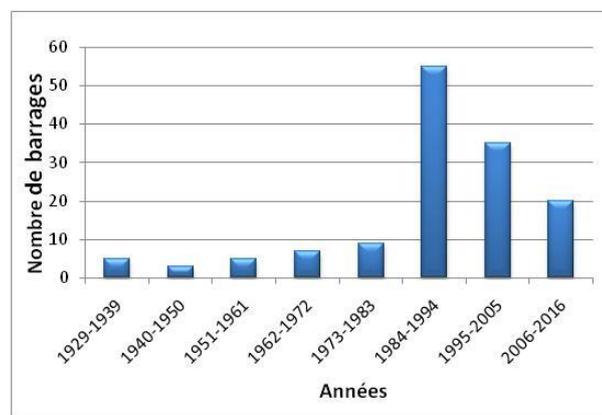


Figure 12 : Evolution du nombre de barrages construits au Maroc

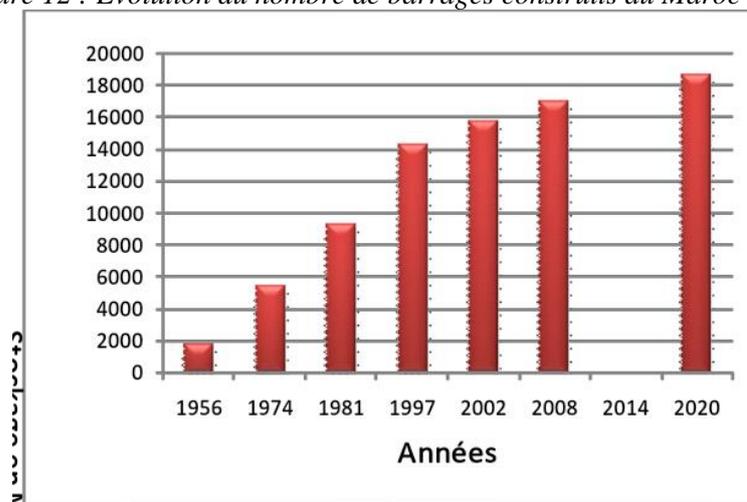


Figure 13 : Développement de la capacité des barrages

Tableau 1 : Taux de réalisation des barrages au Maroc (Ministère de l'équipement, du transport de la logistique et de l'eau, 2019)

Nom de barrage	La province	Taux de réalisation
Barrage Dar Khroufa	Larachebb	Travaux achevés
Barrage Charif Al Idrissi	Tétouan	Travaux achevé
Barrage Tamaloute	Midelt	Travaux achevés

Barrage Oueljet Es Soltane	Khémisset	99.6%
Barrage Timkit	Errachidia	99%
Barrage Kaddoussa	Errachidia	75%
Barrage El Kharroub	Larache et Tétouan	73%
Barrage SIDI ABDELLAH	Taroudant	65%
Barrage M'dez	Sefrou et Boulemane	55%
Barrage Agdez	Zagora	38%
Barrage Tiddas	Khémisset	30%
Barrage GHISS	Al Hoceima	24%
Barrage Essakia El Hamra	Laayoune	18%
Barrage Targa Ou Madi	de Guercif	15%
Barrage Toudgha	Tinghir	15%
Barrage Fask	Guelmim	13%
Barrage Boulaaouane	Chichaoua	Démarrage des travaux
Barrage Ait Ziat	d'El Haouz	Démarrage des travaux

Les précipitations sont plus ou moins augmentées dans l'hiver 2020/2021 donc une élévation de la réserve et du taux de remplissage des barrages au Maroc cette année par rapport à l'année précédente.

Tableau 2 : Comparaison de la Situation journalière des principaux grands Barrages au Maroc

	Capacité normale Mm ³	21/06/2020		21/06/2021	
		Réserve Mm ³	Taux de remplissage	Réserve Mm ³	Taux de remplissage
Ensembles de barrages	16122,6	7436,3	47,7	7749	48,1

II.2 : Edification du barrage Hassan II

Le Maroc est subdivisée actuellement, selon le nouveau découpage administratif, en 12 régions dont la Région de l'Oriental qui occupe toute l'extrémité Est du pays, et couvre une superficie de 90 127 km².

Le bassin versant de la Moulouya, couvre une grande partie du Maroc oriental, qui accommode cinq grands barrages jalonnant le cours de la Moulouya : MachraaHammadi, construit en 1955, Mohamed V, le plus grand des cinq, qui connaît le plus fort taux d'envasement, avec 11,6 millions de m³ /an, construit en 1967, Arabat et Enjil qui datent de 1995 et en fin Hassan II sur l'oued Za, affluent de la Moulouya (Quinquis, 2017).

Tableau 3 : Caractéristiques des barrages sur oued Moulouya Moulouya (badraoui, 2001 ; kettani et

Nom de barrage	Envas. (10 ⁶ m ³ /an)	Mise en service	Qtesed. Retenue (10 ⁶ t /an)	Période (an)	Déficit sed.embouch (10 ⁶ t)
Mohamed V	11,6	1967	18,44	37	682,42
M. Hommadi	1	1955	1,59	49	77,91
Hassan II		2005			
Arabat	0,04	1995	0,063	9	0,57
Enjil	0,24	1995	0,38	9	3,43

II.2.1 : Généralité sur le barrage Hassan II :

Le barrage Hassan II est parmi les plus grands barrages du Maroc dont les travaux ont été lancés en avril 2001 et mis en service en 2005. En réalité, le barrage Hassan II se classe actuellement, de point de vue capacité, comme le plus grand barrage dans le bassin de la Moulouya avec une capacité de stockage de l'ordre de 400 Millions de mètres cube (Chahboune et al, 2013).

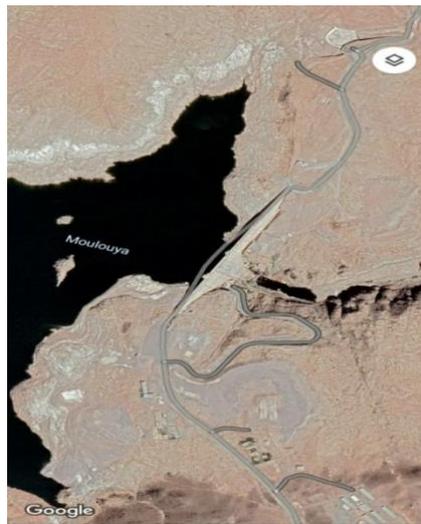


Figure 14 : Image satellite du barrage Hassan II (Google Earth)

II.2.2 : Les caractéristiques générales du barrage Hassan II :

✓ Caractéristiques de la retenue

- Niveau de la retenue à la cote normale : 1 370 NGM (nivellement général du Maroc),
- Aire de la retenue à la cote normale : 12,7 km²,
- Volume de la retenue à la cote normale : 400 Mm³,
- Volume régularisé moyen annuel : 100 Mm³

✓ Caractéristiques d'ouvrage : Barrage proprement dit

- Type : poids en béton compacté au rouleau (BCR),

- Hauteur maximale sur fondation : 115 m,
- Longueur en crête : 600 m,
- Largeur en crête : 7 m,
- Terrain de fondation : granite,
- Cote de la crête : 1 375 NGM,
- Volume du corps du barrage : 600 000 m³

II.2.3 : Rôle du barrage Hassan II :

Le barrage Hassan II a été édifié pour exercer plusieurs rôles Parmi lesquels on note:

- Constitue une considérable réserve d'eau destinée à la production de l'eau potable et l'irrigation pour les zones de Midelt, Zeïda, Missour et les ruraux avoisinants, (BACHIR, 2008).
- Contribue à la protection des zones aval contre les inondations,
- Participe à l'allègement de l'envasement du barrage Mohammed V, situé en aval,
- Offre un environnement touristique attirant,
- Constitue un refuge pour les oiseaux migrateurs.

II.2.4 : L'envasement du barrage :

La perte des volumes de stockage des barrages évolue à un rythme important : près de 5% de capacité de stockage sont perdues annuellement. Sur une capacité de stockage globale de 14500 Mm³ plus de 1000 Mm³ ont été perdus par envasement. Si ce phénomène trouve son origine dans des facteurs physiques tels la nature du terrain et sa pente, la couverture végétale, et l'intensité des précipitations, l'activité humaine l'accentue. Le défrichement, le surpâturage, et les techniques de culture inappropriées sont, en effet, autant de facteurs qui aggravent le processus d'érosion.

En effet, le bassin versant de l'oued Moulouya se caractérise généralement par des formations lithologiques dominantes fortement sensibles et érodables qui favorisent l'érosion hydraulique, et par conséquent la cause principale de l'envasement du barrage Hassan II (Hannani, 2015). Ainsi, l'emplacement de ce barrage, à environ 10 km en aval du site minier abandonné sans réhabilitation de Zeïda, qu'il était l'un des grands gisements plombifère (durée d'activité entre 1972 et 1985) porte à ce barrage des stocks de résidus miniers non végétalisés, des carrières profondes, du matériel et des ateliers abandonnés. Ce site constitué donc un risque majeur de la pollution pour les ressources en eau de surface de la Haute Moulouya et précisément Barrage Hassan II qui

affecte les populations locales qui utilisent ces eaux sans traitement préalable ainsi les êtres vivants qui vit dans ces eaux. En outre, les déchets miniers de Zeïda s'ajoutent pour amplifier le phénomène d'envasement qui diminue rapidement la capacité de stockage de la retenue qui se traduit par un abaissement des niveaux des services rendus par la retenue.

II.3 : Aperçu sur les travaux antérieurs :

Plusieurs études en été réalisés dans le district de Zeïda, aussi bien sur les sédiments que sur les eaux fluviales et du barrage Hassan II. Ces dernières se sont révélées contaminées par les éléments traces métallique issus des résidus de la mine Zeïda. La ville de Midelt est alimentée en eau pour la consommation à partir de ces eaux du barrage sans aucun traitement préalable (El AZHARI, et CHAOUI, 2017 - 2013). C'est dans cette perspective que se réalise le présent travail ayant pour objectif l'étude de la qualité hydrochimique des eaux de barrage Hassan II.

III : Description de site d'étude :

III.1 : Situation géographique :

Avec une superficie de 74.000 km², Le bassin de la Moulouya se trouve dans la partie nord-est du Maroc (soit 10% du territoire du pays). En effet, la zone de ce bassin couvre la quasi-totalité de la région administrative de l'Oriental (provinces de Nador, Figuig, Jrada, préfecture d'Oujda-Angad, Berkane-Taourirt). Elle recouvre en partie les régions de Meknès-Tafilalet (province de Khénifra), Taza-Al Hoceïma-Taounate (province de Taza) et Fès Boulemane (province de Boulemane).

En outre, le Moulouya est parmi les bassins hydrographiques les plus importants au Maroc, il abrite jusqu'à nos jours cinq grands barrages, dont le barrage Hassan II. (CHAHBOUNE, 2014). Il est limité au nord-est par la Méditerranée, au nord-ouest par la chaîne de Beni-Bouyahi, à l'ouest par les montagnes du Rif oriental et du Moyen Atlas plissé, au sud par le Haut Atlas, sa limite correspondant à la frontière Marocco-Algérienne (Mabrouki, 2016).



Figure 15 : Situation géographique du bassin versant de la Moulouya.(El Hmaidi, 2020)

Selon les accidents géologiques, le bassin de Moulouya est subdivisé en trois sous-bassins, on distingue du nord vers le sud :

- La basse Moulouya,
- La moyenne Moulouya,
- La haut Moulouya où se trouve notre zone d'étude.

D'une part, le bassin occupe une partie de la Meseta oranaise occidentale et encadré à l'ouest par les chaînes montagneuses du Moyen Atlas et au sud par le Haut Atlas et vers l'Est par la Moyenne Moulouya (ZHRAOU, 2007), et d'autre part, il est comme une cuvette intra montagneuse, de forme triangulaire, et encadré par les reliefs moyens atlasique et haut atlasique (Saadi, 2012).

III.2 : Cadre géologique du bassin Moulouya :

La région étudiée appartient au domaine atlasique et plus particulièrement au sous domaine des chaînes atlasiques (Michard, 1976).

Selon les premiers géologues des Atlas marocains, la Haute Moulouya, encadré par un socle et une couverture, vu qu'il dispose de la même histoire géologique (AMRANI, 2007).

III.2.1 : Socle :

Le socle paléozoïque, comprend deux grands ensembles, complètement différents : les schistes et les granites attribués au Cambro-Ordovicien (HOEPFFNER, 1987). Les schistes métamorphiques sont intrudés par des granitoïdes d'âge 330 ± 2 Ma

(OUKEMENI et al, 1995), avec des filons d'amphibolites et des granites mis en place lors de l'orogénèse hercynienne (La ville et al, 1991).

III.2.2 : Couverture :

De point de vue stratigraphique, les terrains de la couverture de la Haute Moulouya a d'âge triasique repose sur les terrains paléozoïque du socle en discordance angulaire, EMBERGER, 1965 ; COMBE et SIMONOT, 1971a). La série triasique qui remplit les milieux concaves de la paléo-surface (DERRAR, 1996), est surmontée par les marnes et les calcaires liasiques avec une faible épaisseur et de multiples faciès littoraux (DAGALLIER, 1977).

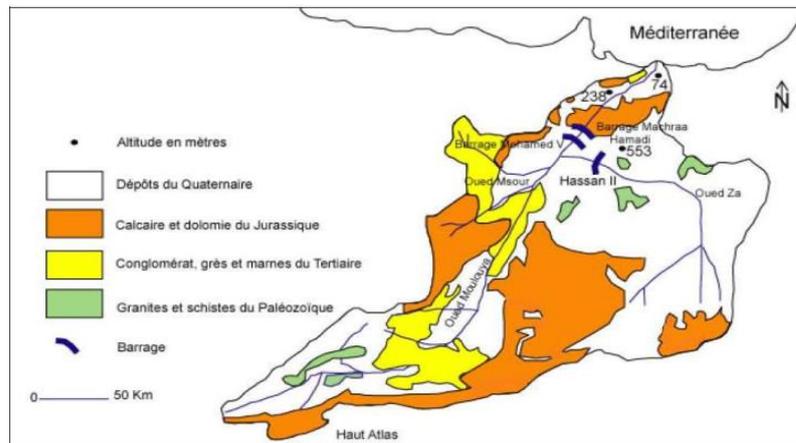


Figure 16 : Bassin versant et géologie de la Moulouya (Bou abdallâh et Larue, 2009).

III.2.3 : Formation mésozoïque :

I.1.1.1 : Le Permo-Trias :

Il caractérise par des dépôts argilo-salifères et détritiques rouges : conglomérats, arkoses, grès argileux rouges posé directement sur le socle granitique. (EL MEHDI BENYASSINE et ABDELILAH DEKAYIR, 2013) Avec une série de venues volcaniques de nature basique intermédiaire, (Termier, 1948) surmontée par une formation évaporitique (gypse). (EL MEHDI BENYASSINE et ABDELILAH DEKAYIR, 2013)

I.1.1.2 : Trias :

Le Trias affleure en discordance angulaire sur les terrains paléozoïques du socle sans intermédiaire, représenté par des marnes, des dolérites, des argiles rouges et des basaltes. Le trias affleure en continuité entre les 2 boutonnières, cette formation repose des fois directement sur les schistes paléozoïques sans intermédiaire de bas conglomératique (AMRANI, 2007)

I.1.1.3 : Jurassique :

Il affleure sur les bordures du Haut Atlas et celle du Moyen Atlas, et à l'ouest des hauts plateaux en présentant des formations d'âge différent (Amrani, 2007)

Le Lias inférieur : il y a des éléments de base de la future chaîne des Atlas (Studer, 1980), les deux sillons atlasiques étaient limités par des failles normales et parallèles à l'allongement des deux chaînes du Moyen et Haut Atlas (Amrani, 2007) où se trouvent des puissantes séquences dolomitique et calcaro-dolomitique, surmontées de marnes et d'argiles (Elazhari, 2013) repose parfois directement sur les basaltes triasiques (AMRANI, 2007)

Le Lias Moyen : il s'agit d'une puissante série de plates-formes carbonatées constituées de calcaires et calcaires dolomitiques (FELENC & LENOBLE, 1965), représentée par une alternance avec des marnes grises, surmontée au sommet de la série, par une couche fine de calcaire rose, avec des intercalations d'argiles rouges (Elazhari, 2013).

Le Lias supérieur : Le cycle du Lias supérieur est caractérisé par un changement net, et parfois brutal, de la sédimentation calcaire, au dépôt marneux terrigène (Dresnay, 1979), correspondant au remplissage des sillons marins (Elazhari, 2013). Dans ces formations carbonatées, on trouve le logement de la minéralisation plombo-barytique de Mibladen, en deux niveaux intercalés (NAJI, 2004). La fin de ce cycle est marquée par le retrait définitif de la mer du domaine atlasique, définie comme une grande transgression de la fin du Jurassique après le Bathonien (Michard, Gazée et al , 1976 - 1978).

Le Dogger : est constitué de dépôts calcaires et marno-calcaires à niveau argileux vers la base (Elazhari, 2013), avec d'éléments du Bajocien et du Bathonien (Gazée et al, 1978), il contient une communauté faunistique de type Brachiopodes, Bélemnites et Echinodermes (NAJI, 2004).

I.1.1.4 : Le Crétacé (céno-manien) :

L'affleurement du crétacé se fait le long du Haut Atlas entre le massif d'Aouli et le Haut Atlas à l'Est de Midelt, comme des formations évaporitiques à caractère continental riche en faune du domaine littoral : lamellibranche, oursins, gastéropodes (Raynal, 1961) à cause de l'érosion et de l'émersion, il repose directement sur le Dogger moyen (EMBERGER, 1965)

A la fin du Crétacé, les majeures parties du domaine atlasique et hauts fonds étaient émergées et quittaient définitivement le domaine marin. (AMRANI, 2007), d'après (SCHMITT, 1976).

semi-aride à aride. En raison de son vaste étendu, le bassin versant de la Moulouya est caractérisé par des microclimats variables dans ces différentes régions essentiellement dû à l'altitude et la continentalité (Ibouhouten et al, 2009).

On peut distinguer trois zones climatiques (COMBE et SIMONOT, 1971)

- Un climat subhumide au nord-est du bassin
- Un climat continental au niveau de la moyenne Moulouya
- Un climat semi-aride mésothermique sec à tendance Montagnier démarqué dans la haut Moulouya (Chaoui, 2013) qui est largement influencé par l'orographie atlasique. L'été est très chaud et orageux (33,8°C en juillet), l'hiver est froid (-1,3°C en janvier) et la température moyenne annuelle est de 13°C (journal, 2020)

- le climat est doté d'une atmosphère sèche purement continentale quoique relativement fraîche lorsque les vents d'ouest dominant (COMBE et SIMONOT, 1971) qui caractérisent par une vitesse maximale des vents varie entre 20 et 50m/s au sol, L'action érosive des vents est d'autant plus amplifiée que le couvert végétal est réduit (Hachimi, 2006).

Le régime des précipitations est variable durant toute l'année, les précipitations maximales sont observées au printemps (Avril-mai), les minimales en été (juillet-septembre, l'automne est humide tandis que l'hiver est sec (Hachimi, 2006) .

1.3 : Cadre hydrologique :

Le bassin versant de la Moulouya, est le plus grand bassin hydrographique du Maroc (Elazhar, 2013), caractérisé par une multitude d'affluents, et par son collecteur principal Oued Moulouya, d'une longueur de 188 km, prend naissance à la haute Moulouya, à la jonction entre le Haut Atlas et le Moyen Atlas. Il est Caractérisé par un régime très irrégulier, les apports annuels de l'oued Moulouya varient entre 270 Mm³ pour les années sèches, et 1200Mm³ pour les années humides. L'écoulement superficiel de la Moulouya est très variable d'une année à l'autre, des débits de crues importants et des étiages faibles ou nuls (Boudot, 2009).

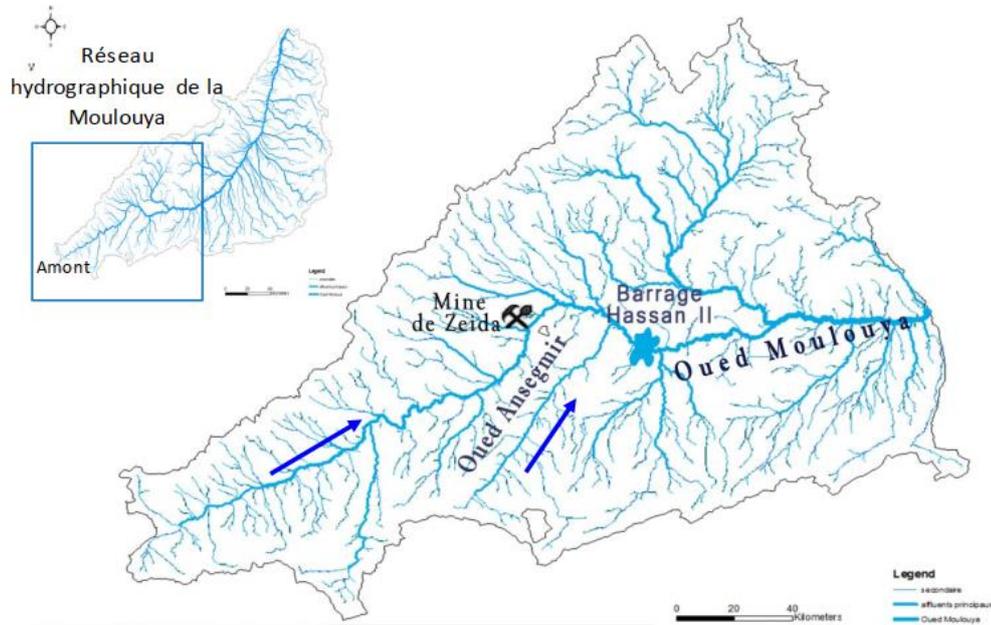


Figure 18 : Le réseau hydrographique de la haute Moulouya réalisé à base d'MNT (Elazhari, 2013)

Il y a beaucoup d'affluents alimentant l'oued Moulouya, le principal est l'oued Ansegmir, d'une longueur de 80 km. Il prend naissance au Haut atlas, et draine par la suite une superficie de 800km² (Ahamrouni, 1996), alimenté essentiellement par la fonte des neiges, il joue le rôle de régulateur de la Moulouya (El Hachimi, 2006), surtout grâce à son écoulement pérenne. Pour les autres affluents possèdent un régime torrentiel, intermittent et sec durant la majeure partie de l'année, mais suite à des pluies importantes, et dû à l'imperméabilité du substrat.

Pour les eaux de surface, on trouve aussi le barrage Hassan II et les lacs de carrières qui ont une dimension immense ont été délaissés sans aménagement, remplie par des millions de mètre cubes d'eau issu des nappes et du ruissèlement.

Pour les eaux souterraines, Le bassin hydrogéologique de la Moulouya renferme une trentaine de nappes d'importance qualitative et quantitative différente. Selon le BHM, la recharge du système aquifère en Haute Moulouya-sillon itzer/enji atteint les 120Mm³/an. Il s'étend sur 3300km², le bassin comporte 5 aquifères principaux :

- Les nappes du mio-plio-quadernaire, totalisant un débit de 52Mm³/an, utilisée surtout pour l'irrigation via 12 sources (3Mm³/ an), cependant ces nappes sont vulnérables à la pollution,
- La nappe des calcaires du crétacé donne naissance à une quinzaine de sources, débitant une moyenne de 12.3Mm³ /an pour l'irrigation de tout type,
- La nappe des calcaires bajociens, dont les débits de ses sources atteignent les 382l/s, destinés à l'irrigation, avec quelque forage pour l'alimentation en eau potable,
- L'aquifères calcaire du lias est aussi utilisé pour l'irrigation via 17 sources débitant

34Mm³/an, il joue un rôle important dans l'alimentation de l'Oued Ansegmir,
- Quant à la nappe des granites et argile gréseuses, son volume global prélevé atteint 3.3Mm³/an, utilisé pour l'irrigation de 1330ha de terres agricoles (Elazhar, 2013).

II : APPOTS DE CHIMIE DE LA MOLCULE D'EAU :

Cette partie de ce mémoire, est consacré à l'étude de l'hydrochimie des eaux de barrage Hassan II. En premier lieu, nous présentons les différentes analyses effectuées et en second lieu les résultats de ces analyses feront objet d'interprétation et de discussion.

II.1 : Méthodologie :

Après le choix des stations, Les eaux prélevées au sein du barrage Hassan II, font appel à deux types d'analyses :

- Mesure in situ,
- Analyse au laboratoire.

II.1.1 : Echantillonnage et mesures in-situ :

▪ Echantillonnage :

Dans cette étude le choix a été porté sur 10 stations pour réaliser l'échantillonnage des eaux. En effet, Dix (10) échantillons ont été prélevés des eaux de barrage Hasan II, par l'équipe du Pr. Ali RHOUJJATI, Pr. Lahoucine HANICH et étudiante de master Fatima-zahra BOUNIT et PhD Etudiante Soukaina OUDCHAIRA du 3 au 6 Avril 2021 dans les localisations suivantes (Figure 19).

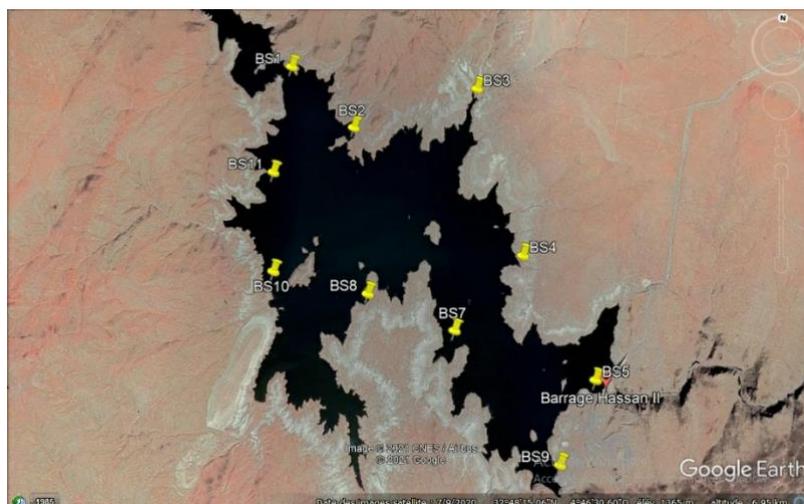


Figure 19 : Localisation des stations d'échantillonnage au niveau de barrage Hassan II (Google Earth).

Au niveau de chaque localité, une procédure systématique est adoptée ; elle

consiste à relever les coordonnées géographiques du l'endroit ainsi que l'altitude et l'heure du prélèvement (tableau 4).

Tableau 4 : Localisation des stations selon les coordonnées

Code	Lat(X)	Long(Y)	Z
Unité	DD	DD	M
BS1	32,810	4,800	1349
BS2	32,812	4,781	1347
BS3	32,802	4,777	1346
BS4	32,796	4,767	1341
BS5	32,812	4,770	1327
BS7	32,793	4,783	1347
BS8	32,796	4,786	1345
BS9	32,788	4,789	1346
BS10	32,797	4,798	1347
BS11	32,801	4,801	1350

▪ **Mesure in situ**

A cause de leur évolution très rapide un certain nombre de paramètres doivent être mesuré in-situ pour acquérir les données physiques et chimiques de l'eau. Les principales mesures de terrain sont les suivantes :

- La température de l'eau : c'est un paramètre physique variable, influence tous les autres paramètres physiques et les équilibres chimiques (Snineh, 2013). Elle dépend essentiellement de la température de l'atmosphère (lkbeir, 2013),
- Le potentiel d'hydrogène (pH) : c'est un paramètre physique, en relation étroite avec la concentration des ions hydrogène H⁺ présents dans l'eau, (pH= - log [H₃O⁺]).

Il permet de donner une idée sur l'activité ou non de ces ions et aussi l'alcalinité d'une eau, c'est un paramètre sans unité (Lkbeir, 2013),

- La conductivité électrique de l'eau (µS/cm) : c'est le pouvoir qu'a une eau à faire passer le courant électrique. Elle permet d'avoir une idée sur la minéralisation totale d'une eau (Snineh, 2013),
- La salinité (g/L) : c'est la mesure de la concentration des sels dissous (chlorure de sodium, chlorure de magnésium) dans une eau à travers la conductivité électrique,
- Le total de solide dissous, (µg/l) : c'est un paramètre utilisé pour évaluer la qualité d'eau par la détermination de la quantité totale des substances organiques et inorganiques dissous dans cette eau.

Tous ces paramètres ont été mesuré par un seul appareil qui est l'analyseur multi-paramètre sous le nom Orion élite PCSTS tester kit (Figure 19).



Figure 20 : Analyseur multi paramètre utiliser pour les mesures in-situ (clarksonlaboratory).

▪ **Analyses au laboratoire**

Toutes les analyses chimiques effectuées étaient réalisées au sein du laboratoire d'eau et d'environnement au département chimie à la faculté des sciences et techniques de Marrakech sous l'aimable direction du Pr Hakkou Rachid. Les analyses de Calcium (Ca^{2+}) et Magnésium (Mg^{2+}) sont effectuées dans un laboratoire agréé (Afrilab) à l'échelle internationale sous la direction de Mr HararaRédouane. Les analyses des éléments majeurs de l'eau comportent l'analyse des anions : bicarbonates (HCO_3^-), carbonates (CO_3^{2-}), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}) et nitrates (NO_3^-). Les analyses des cations alcalins comprend : sodium (Na^+), potassium (K^+) et des alcalino-terreux (calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+})).

✓ **LES ANIONS**

- Alcalinité de l'eau (HCO_3^- et CO_3^{2-})

C'est la capacité de l'eau à accepter les ions H^+ , elle est déterminé à l'aide d'une titration acide (Figure 20) : en présence de phénophtaléine pour le **Titre Alcalimétrique (TA)**, il correspond à la neutralisation des ions CO_3^{2-} en HCO_3^- en réagissant avec un acide fort (Avec : $\text{TA} = \text{OH}^- + 1/2 \text{CO}_3^{2-}$). L'utilisation de l'hélianthine pour le **Titre alcalimétrique Complet (TAC)** ; titre alcalimétrique complet, égale à la somme de OH^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- ; ce titre correspond à la neutralisation de toutes ces formes par un acide fort (Hemrioui, 2009).



Figure 21 : les réactifs pour la méthode de titration Des carbonates et des bicarbonates

- Ions chlorures (Cl⁻) :

Les ions chlorures (Cl⁻), sont des éléments conservés qui se trouvent naturellement dans les eaux naturelles avec des concentrations très variables (Ikebir, 2013). Le dosage de chlorures se fait selon la méthode de Mohr, qui consiste à l'utilisation d'une solution de nitrate d'argent (N/10) en présence de chromate de potassium comme indicateur coloré (Figure 21).

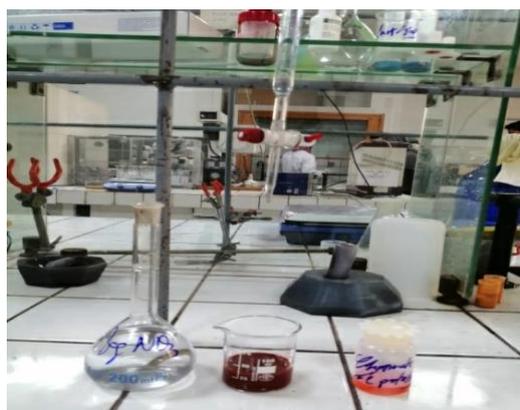


Figure 22 :réactifs pour titration des Chlorures

- Sulfates (SO₄²⁻)

Ce sont des anions les plus importants dans les eaux naturelles, il existe différentes méthodes de détermination des sulfates basées toutes sur la formation de sulfate de baryum (Ba SO₄) insoluble. Nous avons procédé par la méthode néphélométrie, qui a été améliorée et développée pour que le dosage des sulfates en faible teneurs devient automatique (Verduyn et Derouane, 1973). En outre, on utilise la spectrophotométrie, qui est une méthode analytique quantitative consistant à mesurer l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée, généralement en solution (Rodier, 1984).



Figure 23 : Spectrophotomètre

- Nitrates (NO_3^-)

Contenant dans La plupart des eaux naturelles à des doses faibles (quelques milligrammes par litre), La détermination des nitrates était effectuée par la méthode de la réduction par colonne cadmium traité au cuivre (Ikbeir, 2013).



Figure 24 : Spectrophotomètre portable

✓ Les cations

- Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+)

Le sodium est un élément constant de l'eau. Par contre le potassium est l'élément le moins abondant dans l'eau ; ces ions ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme (Lkbeir, 2013).



Figure 25 : Spectrophotomètre à flamme

- Calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+}

Le calcium (Ca^{2+}) est le cation le plus abondant dans tous les types d'eaux. En effet, la teneur de Ca^{2+} est liée à la concentration du CO_2 dissous dans l'eau.

Le magnésium (Mg^{2+}) est un élément abondant dans la nature. Il se trouve naturellement dans plusieurs roches ignées et sédimentaires, les eaux de mer, etc.

Pour déterminer la présence de ces éléments dans les échantillons ; on les ramène au

laboratoire pour les titrer à l'aide de la technique analytique à plasma à couplage inductif (ICP-AES). C'est une technique permettant de mesurer la teneur d'un élément inorganique présent dans un échantillon d'eau.

III : Résultats des analyses et discussions :

Dans cette partie nous présenterons les résultats des mesures in-situ et des analyses chimiques (tableau 5) ainsi qu'une interprétation exhaustive.

Tableau 5 : Représentation des résultats des analyses chimiques

Code	HCO3	CO3	SO4	CL-	NO3-	Na	Ca	Mg	Totale des solides dissous (TDS)
	Mg/l								ppm
BS1	151,28	67,2	24,06	7,1	0,43	22	44,66	26,98	465
BS2	170,8	48	25,18	5,68	0,48	22	43,26	26,76	455
BS3	200,08	28,8	26,30	5,68	10,64	26	43,84	26,43	459
BS4	161,04	67,2	25,18	12,78	1,29	30	43,88	26,37	455
BS5	200,08	33,6	23,50	8,52	1,21	26	44,67	26,47	455
BS7	190,32	38,4	25,18	7,1	1,29	26	43,51	26,2	460
BS8	146,4	67,2	22,94	9,94	1,68	26	36,79	26,57	435
BS9	209,84	48	27,98	5,68	1,21	26	43,38	26,57	454
BS10	175,68	48	18,47	7,1	1,08	26	44,08	26,19	456
BS11	180,56	38,4	22,38	8,52	0,79	26	43,82	26,72	457

Le dépouillement des données relatives aux analyses chimiques montrent que :

- les stations des eaux de barrage présentent une minéralisation moyenne de l'ordre de 455,1 mg/l et ne dépasse pas 1000mg/l selon les normes relatives à la qualité des eaux marocaines ; ces eaux sont par conséquent consommables ;
- La dominance du calcium (moyenne=43,189mg/l) et du magnésium (moy=26,526mg/l) comme anions et des bicarbonates (moy=178,608mg/l) comme cation caractérisant toutes les stations ;
- Les Nitrates ne dépassent pas 1mg/l sauf à la station BS₃ qui présente une teneur égale à 10mg/l, ceci peut être dû à des apports anthropiques.

III.1 : Qualité des analyses chimiques estimée à l'aide la balance ionique (BI) :

Pour assurer la fiabilité des résultats obtenus on doit calculer la Balance Ionique

(BI), basée sur le calcul de l'électro neutralité des eaux, c'est-à-dire l'égalité entre la somme des cations et la somme des anions.

Cet outil prend en considération seuls les ions majeurs (calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ et potassium K^+ pour les cations ; chlorures Cl^- , sulfates SO_4^{2-} , nitrates NO_3^- , carbonate CO_3^- et bicarbonate HCO_3^- pour les anions), il s'exprime en pourcentage d'erreur.

La Balance Ionique est exprimée de la manière suivante :

$$BI = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100$$

Avec $\sum \text{cations} - \sum \text{anions}$ exprimés en méq/l.

Selon la valeur de la balance ionique trouvée, les analyses chimiques sont classées comme suite :

- **BI < 5 %** : analyses acceptables et fiables,
- **5 % < BI < 10 %** : analyses admissible,
- **BI > 10 %** : analyses douteuses à réétudier dans, ce cas il est nécessaire de chercher la cause (erreur, mauvaises analyses etc.).

NB : Si **BI = 0** les analyses sont parfaits.

La balance ionique calculée pour les stations sont portées dans le tableau ci-dessous (Tableau 9). En effet la balance ionique de toutes les eaux des stations est inférieure à 5% d'où la plupart des analyses sont de bonne qualité sauf les eaux de la station BS11 qui a des analyses acceptables.

Tableau 6 : Représentation des résultats de calculs de la balance ionique.

Code	total anions	total cations	Cations+Anions	Cations - anions	BI
	méq/l				%
BS1	5,428	5,465	10,893	0,038	0,344
BS2	5,092	5,377	10,469	0,285	2,727
BS3	5,119	5,553	10,672	0,434	4,067
BS4	5,785	5,724	11,509	-0,061	-0,529
BS5	5,149	5,598	10,747	0,449	4,178
BS7	5,145	5,518	10,663	0,373	3,495
BS8	5,425	5,213	10,638	-0,212	-1,990
BS9	5,802	5,542	11,344	-0,260	2,294
BS10	5,082	5,545	10,627	0,463	4,361
BS11	4,962	5,576	10,538	0,614	5,825

➤ Interprétation des Données :

Afin de pouvoir analyser les données et en ressortir le plus d'information en une courte durée, on utilise le logiciel DIAGRAMMES (Figure 25) créé par Roland SIMLER du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant l'exploitation d'analyse d'eau (DOMINIQUE, 2009).

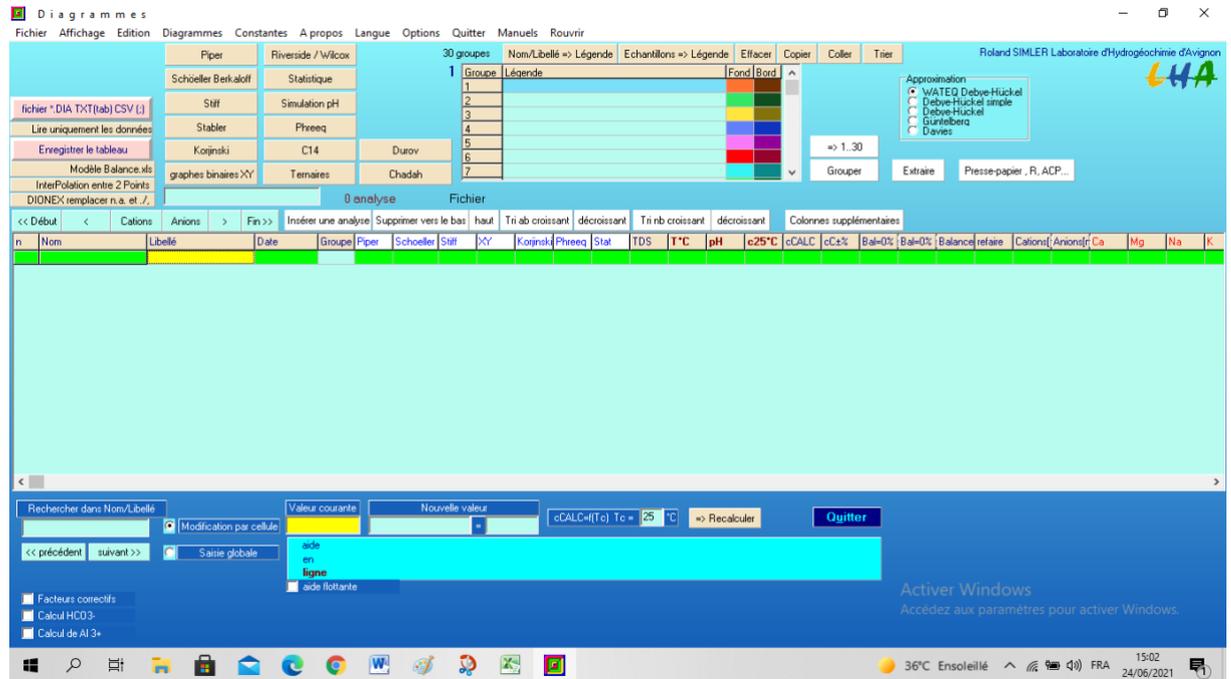


Figure 26 : Interface de commande du logiciel DIAGRAMME (Capture personnelle)
Il a des fonctions variables parmi lesquelles on cite l'établissement des deux diagrammes de PIPER et de SCHOELLER.

III.2 : Projection des eaux sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff :

C'est un diagramme semi-logarithmique permet de représenter les faciès chimiques de plusieurs échantillons d'eaux, contient différents lignes :

- lignes verticales représentent la concentration de chaque élément chimique,
- lignes brisées représentent les échantillons formés en reliant tous les points démontrés les éléments chimiques. Ce diagramme montre le degré de minéralisation des eaux.

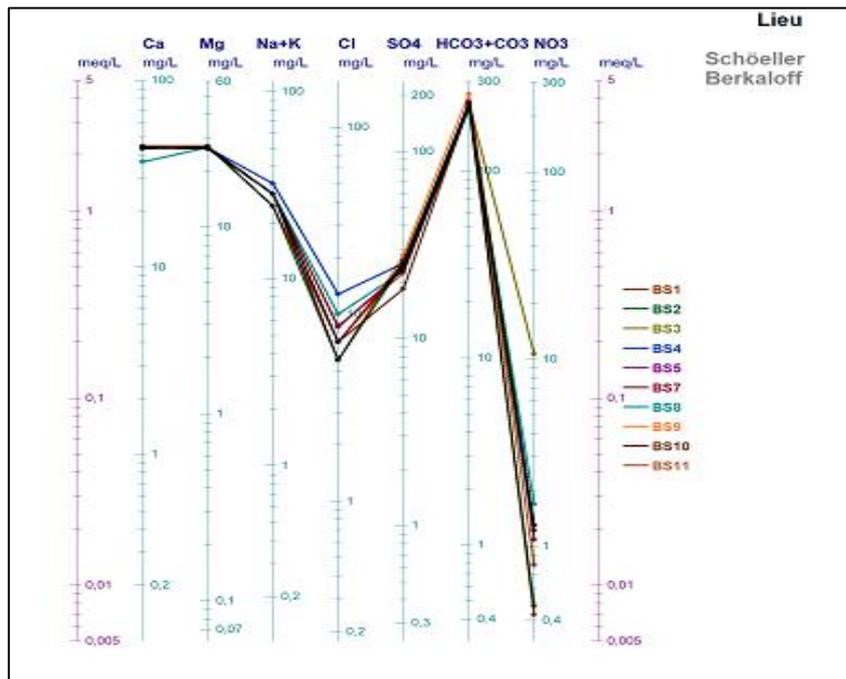


Figure 27 : Projection des eaux de Barrage Hassan II sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff

Le diagramme Schoeller (figure 27) montre que les eaux de barrage présentent la même affinité selon la composition chimique.

Le diagramme montre également que tous les échantillons présentent presque le même type de minéralisation. Toutefois, on a une dominance de bicarbonate HCO_3 , carbonate CO_3 , calcium Ca et magnésium Mg, étant donné dans un contexte lithologique constitué essentiellement du calcaire et calcaire dolomitique.

III.3 : Projection des analyses sur le diagramme de Piper

Pour comparer les compositions chimiques des eaux on utilise le diagramme de Piper (Figure 28), il permet de représenter plusieurs échantillons simultanément. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global.

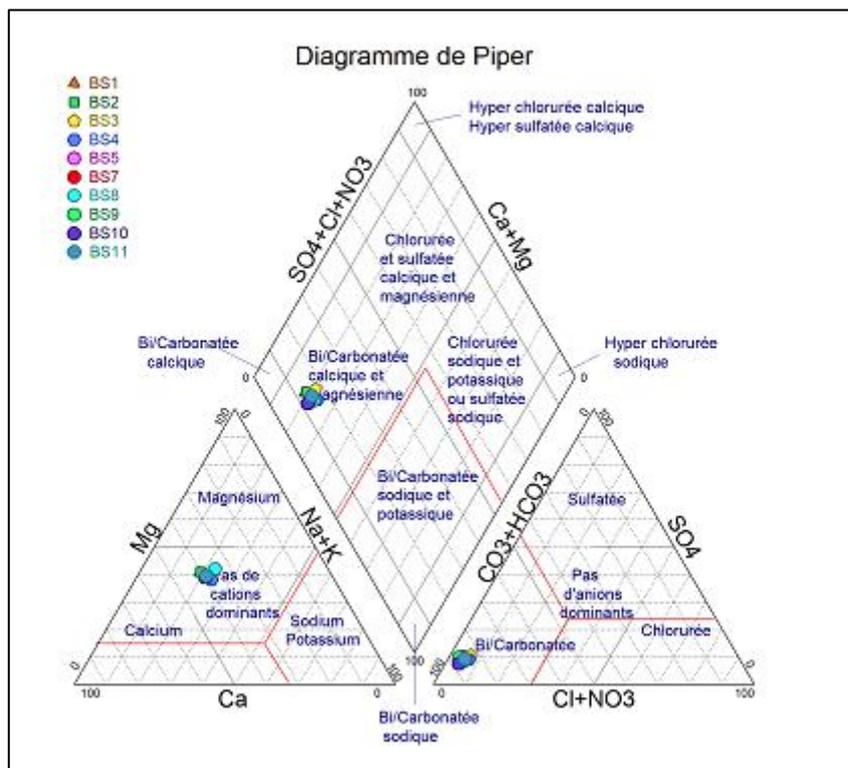


Figure 28 : Projection des eaux de Barrage Hassan II sur le diagramme de Piper

III.4 : La Nature du faciès chimiques :

La projection des analyses des échantillons des eaux étudiées qui est représentée dans la figure ci-dessus (Figure 28) montre que ces eaux se répartissent selon le même faciès qui est : le faciès Bicarbonaté calcique et magnésien. Dans ces eaux on remarque que les bicarbonates et les carbonates, le calcium, le magnésium, sont respectivement les anions et cations les plus dominants celui-ci dû à la géologie du bassin versant de la haut Moulouya dominées par les faciès carbonatés (calcaire et dolomies).

III.5 : Minéralisation des eaux :

Minéralisation des eaux de barrages est contrôlée par plusieurs processus parmi lesquelles on cite l'évaporation, les phénomènes d'altération des roches et des sols. Afin de déterminer l'origine de la minéralisation, dix (10) échantillons prélevés sont projetées sur le diagramme de Gibbs (Figure 29). Ce dernier montre que tous les échantillons sont projetés sur le côté gauche montrant que la minéralisation des eaux de barrage Hassan II provient à partir d'une interaction eau-roche.

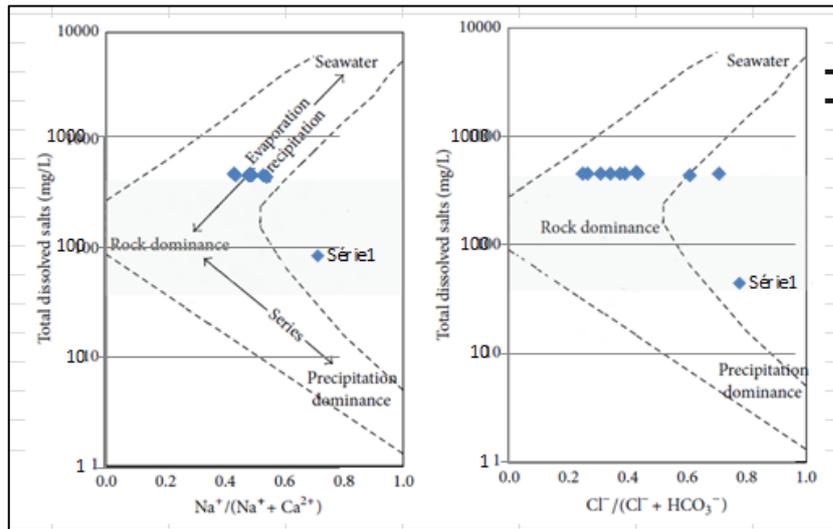


Figure 29 : Projection des eaux de Barrage Hassan II dans le diagramme de Gibbs

III.6 : Traitement des données par l'utilisation de l'analyse en composante principale :

L'analyse des composantes principales connus sous : Principale component analysis (PCA) en anglais, c'est une méthode d'analyse des données multivariées permet de séparer les analyses des stations basant sur la teneur on ions dissous et on plusieurs facteurs dans le but de voir la bonne corrélation entre les éléments chimiques.

Au cours de ce travail l'analyse statistique (ACP) a été réalisée à l'aide du logiciel R version 3.6.3 (Figure 30) et le logiciel XLSTAT (Figure 31)

Les données portent sur l'ensemble des stations et des 7 variables représentés par les teneurs en mg/l des éléments chimiques : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- .

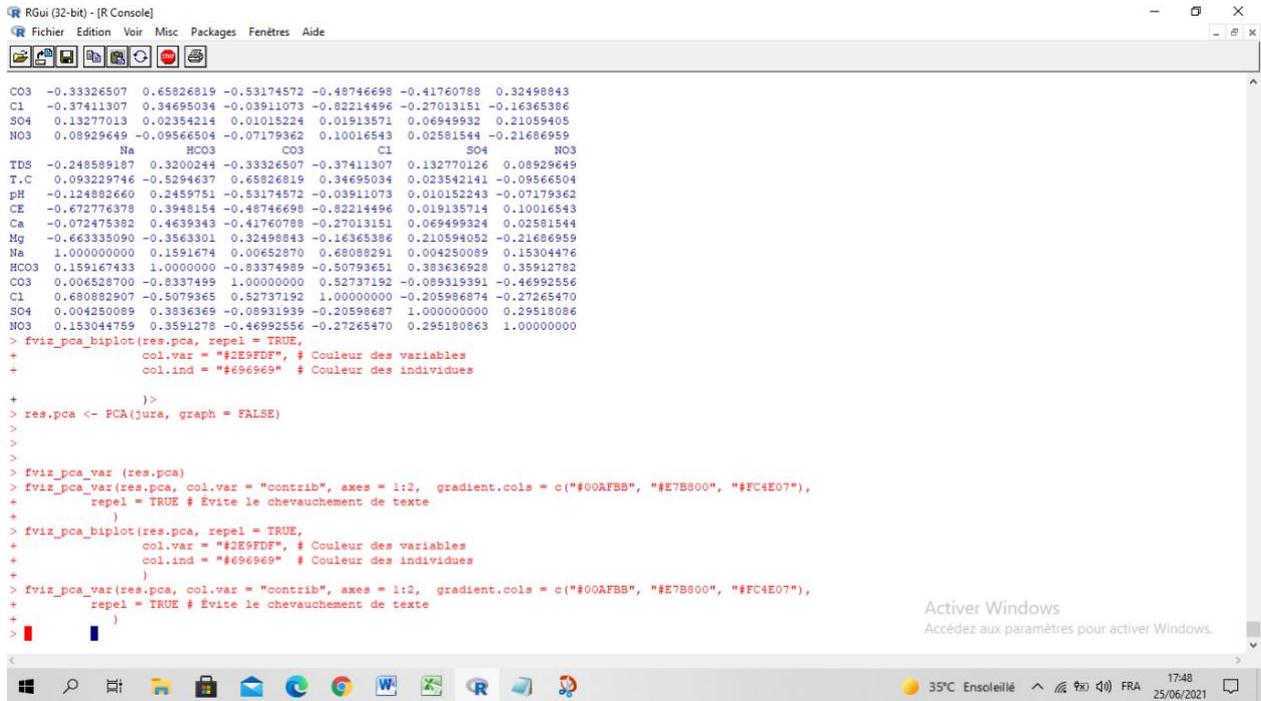


Figure 30 : Interface de commande du logiciel R

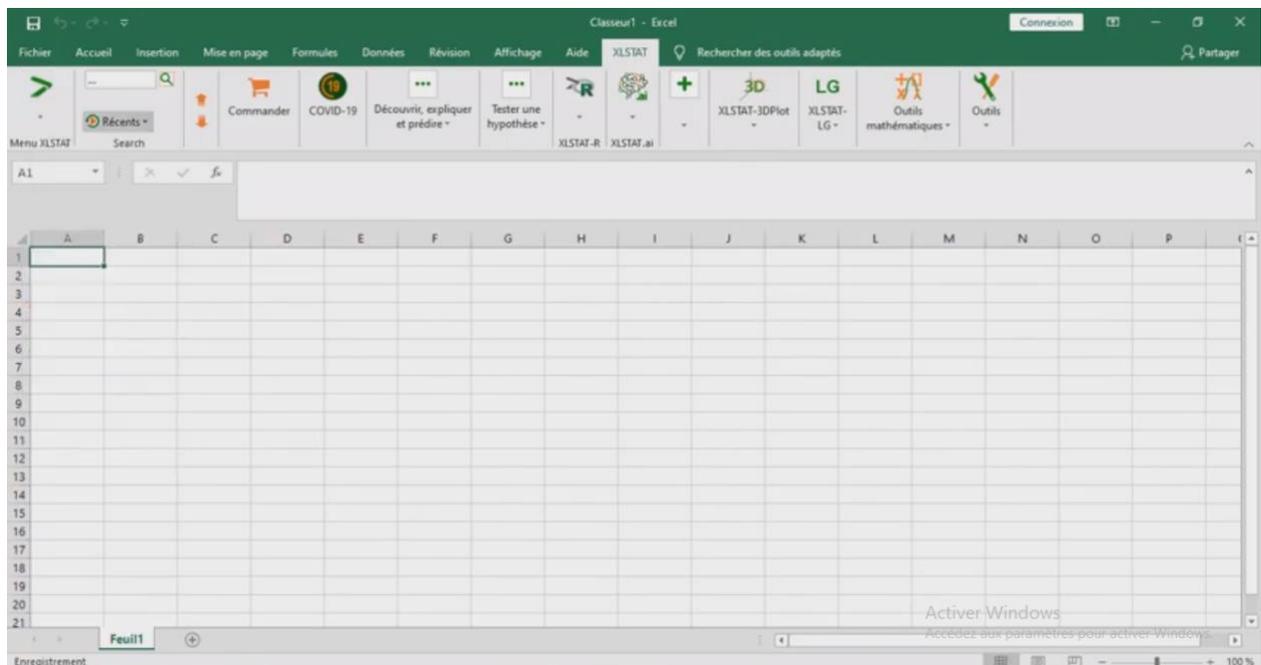


Figure 31 : Interface de commande du logiciel XLSTAT

- **Matrice de corrélation :**

Tableau 7 : Matrice de corrélation des paramètres chimiques analysés des eaux de Barrage Hassan II

Variabes	ph	T°C	CE	Sa	TDS	HCO3	CO3	SO4	CL-	NO3-	Na	Ca	Mg
ph	1												
T°C	-0,281	1											
CE	-0,031	-0,535	1										
TDS	-0,205	-0,735	0,753	-0,139	1								
HCO3	0,246	-0,529	0,395	-0,114	0,320	1							
CO3	-0,532	0,658	-0,487	0,330	-0,333	-0,834	1						
SO4	0,010	0,024	0,019	0,215	0,133	0,384	-0,089	1					
CL-	-0,039	0,347	-0,822	0,509	-0,374	-0,508	0,527	-0,206	1				
NO3-	-0,072	-0,096	0,100	-0,464	0,089	0,359	-0,470	0,295	-0,273	1			
Na	-0,125	0,093	-0,673	0,284	-0,249	0,159	0,007	0,004	0,681	0,153	1		
Ca	-0,098	-0,857	0,615	-0,161	0,923	0,464	-0,418	0,069	-0,270	0,026	-0,072	1	
Mg	0,078	0,120	0,219	0,183	0,095	-0,356	0,325	0,211	-0,164	-0,217	-0,663	-0,024	1

L'analyse de la matrice de corrélations (tableau 7) montre une bonne corrélation positive (supérieure à 0.7) entre les éléments suivants : le calcium et le totale des solides dissous montrent une très forte corrélation estimée de 0,923 suivi par le totale des solides dissous et la conductivité électrique (0,753), et une corrélation négative (supérieure à -0,7) entre les carbonates et les bicarbonates dont la valeur estimée de -0,834, entre les chlorures et la conductivité électrique (-0,822), entre le calcium et la température (-0,857), et entre le totales des ions dissous et la température (-0,735).

- **Valeurs propres :**

Tableau 8 : Axes F1, F2, F3 et F4 retenus, leurs valeurs propres et pourcentages cumulés en %

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	4,773	2,407	1,703	1,440	1,362
Variabilité (%)	36,718	18,515	13,096	11,081	10,479
% cumulé	36,718	55,233	68,329	79,410	89,888

Le tableau ci-dessus présente les facteurs retenus par l'ACP, dont le facteur F1 représentant 32,405% de la variance totale, et le facteur F2 représente une variance de 22,738% de la variance totale. Le plan F1-F2 représente ainsi 55,143% de la variance totale ce qui lui rend n'est pas suffisamment représentatif de la variabilité initiale des données, alors nous avons ajouté les autres deux axes principales F2 et F3 qui désignent 25,547 % de la variance totale.

- **Corrélations entre les variables et les facteurs :**

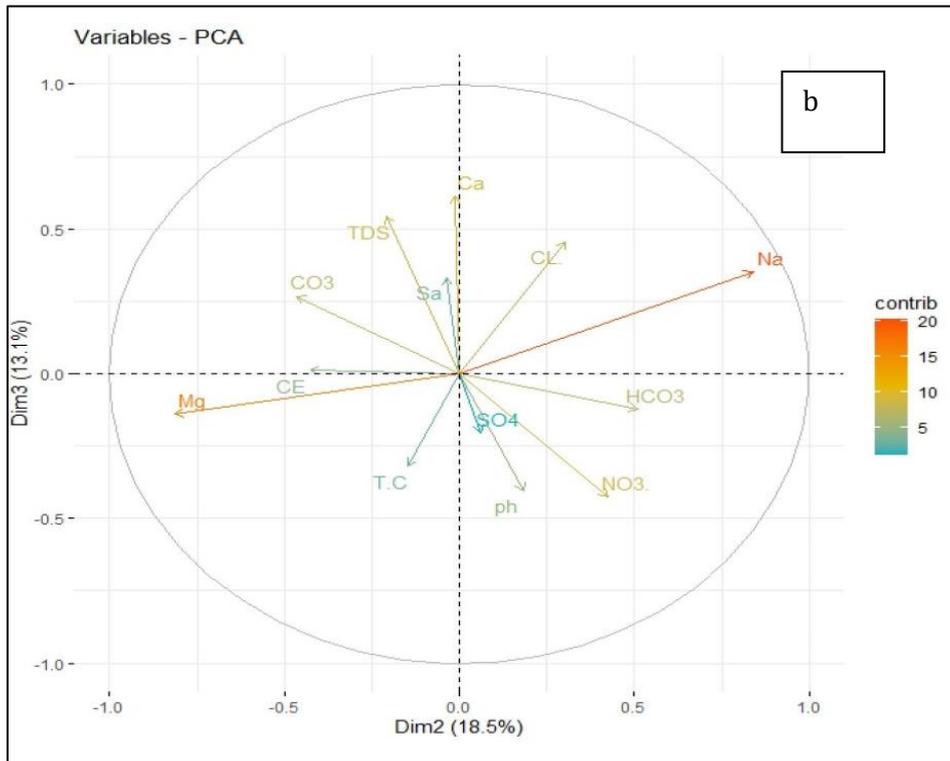
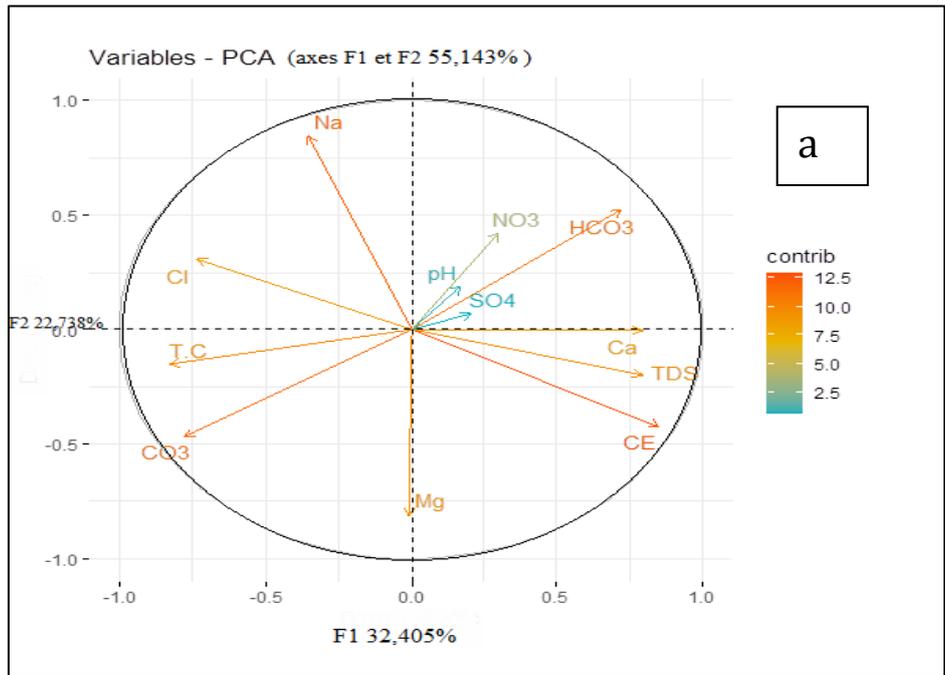


Figure 32 : Représentation graphique des variables en % sur le plan F1 et F2 (a) et sur le plan F2 et F3 (b)

Tableau 9 : Corrélation entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3
ph	0,157	0,185	-0,405
T°C	-0,829	-0,146	-0,320
CE	0,843	-0,428	0,011
TDS	0,767	-0,208	0,543
HCO ₃	0,700	0,512	-0,122
CO ₃	-0,780	-0,466	0,268
SO ₄	0,169	0,062	-0,204
CL ⁻	-0,758	0,303	0,454
NO ₃ ⁻	0,340	0,426	-0,425
Na	-0,366	0,841	0,351
Ca	0,769	-0,013	0,612
Mg	-0,029	-0,813	-0,140

La figure 31 et le tableau 11 présentent les paramètres HCO₃⁻, Ca²⁺, TDS, CE, fortement et positivement corrélés autour de l'axe F1 et négativement on trouve le calcium et la T°C. Concernant l'axe F2, tous les paramètres montrent une corrélation non significative à négative, à l'exception du magnésium expose une corrélation fortement négative (-0,813) et le sodium, montrant une forte et positive corrélation (0,841). Ainsi, l'axe F1 représente les eaux fortement minéralisées, tandis que l'axe F2 représente les eaux riches en sodium et en magnésium.

- **Contribution des variables :**

Tableau 10 : Contribution des variables en %

	F1	F2	F3
Ph	0,517	1,421	9,630
T°C	14,404	0,889	6,022
CE	14,891	7,594	0,006
TDS	12,327	1,802	17,301
HCO ₃	10,256	10,890	0,873
CO ₃	12,730	9,007	4,216
SO ₄	0,602	0,161	2,447
CL ⁻	12,030	3,823	12,123
NO ₃ ⁻	2,423	7,542	10,596
Na	2,809	29,361	7,238
Ca	12,378	0,007	21,976
Mg	0,017	27,448	1,144

Les ions HCO₃⁻, CO₃⁺, Ca²⁺ et Cl⁻ contribuent presque à 47,394% dans le facteur F1, et les variables T°C, CE, TDS représentent 41,622%. Le facteur F2 représente à plus 56,809% pour les ions Na⁺ et Mg²⁺. Et pour le facteur F3 représentent 21,976% pour l'ion Ca²⁺.

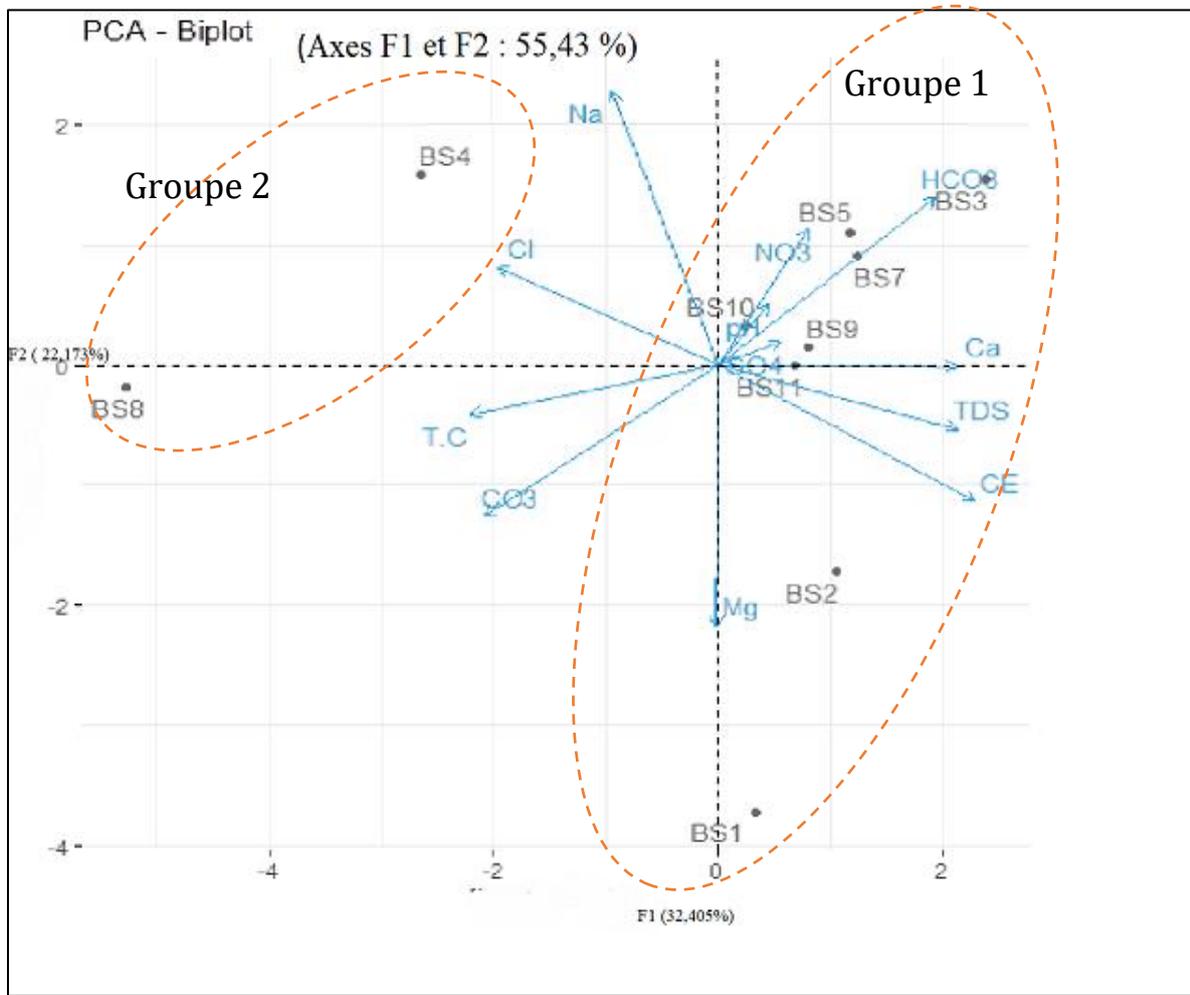


Figure 33 : Projection des variables et des individus dans le plan factoriel F1-F2

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F2 permet de subdiviser les stations en deux groupes :

- **Groupe 1** : regroupe le plus grand nombre des stations d'échantillonnages (BS1/BS2/BS3/BS5/BS7/BS9/BS10/BS11) et aussi les eaux de ce groupe se caractérisent par une minéralisation élevée avec des concentrations importantes en bicarbonates et en calcium et une température faible.
- **Groupe 2** : les eaux (BS4/BS8) du deuxième groupe se caractérisent par une minéralisation et des concentrations de bicarbonates et en calcium et de magnésium faibles en les comparant au premier groupe avec une température élevée.

III.7 : Qualité chimique des eaux :

C'est l'ensemble de caractéristiques générales de l'eau et des concentrations de minéraux dissous dans l'eau. Elle dépend des types de matériaux présents dans le sol et du temps de contact de l'eau avec ces matériaux. La qualité diffère du type des destinations de ces eaux parmi lesquelles on cite :

III.7.1 : Qualité de l'eau destinée à la consommation humaine :

L'eau destinée à la consommation humaine ne doit contenir, en quantité dangereuses, ni substances chimiques, ni germes nocifs pour la santé et doit, en outre, être aussi agréable à boire que les circonstances le permettent. Il faut donc respecté les normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine (Figure 34)

Normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine				
Facteurs organoleptiques				
Odeur	Sens de perception à 25°C	0	3	
Saveur	Sens de perception à 25°C	0	3	
Couleur réelle	Unité Pt mg/l	5	20	
Turbidité	Unité de turbidité Nephel. NTU	1	5	
Facteurs physico-chimiques				
Potentiel Hydrogène	Unité pH	6,5<pH<8,5	9,2	6
Conductivité	µS/cm à 25°C	1300	2700	110
Minéralisation totale	Résidu sec à 105°C Mg/l	1000	2000	100
Dureté totale	mg/l	6		2
Magnésium	Mg mg/l	100		
Aluminium	Al mg/l	0,05		
Ammonium	NH ₄ mg/l	0,05	0,5	
Nitrites	NO ₂ mg/l		0,1	
Nitrates	NO ₃ mg/l		50	
Chlorures	Cl mg/l	300	750	
Facteurs indésirables ou toxiques				
Sulfates	SO ₄ mg/l	200		
Oxygène	O ₂ mg/l	5x10 ⁻⁶		
Arsenic	As mg/l		0,05	
Baryum	Ba mg/l		1	
Cadmium	Cd mg/l		0,005	
Cyanures	CN mg/l		0,1	
Chrome total	Cr mg/l		0,05	
Cuivre	Cu mg/l		1	
Fer	Fe mg/l		0,3	
Fluorures	F mg/l	0,7	1,5	
Manganèse	Mn mg/l		0,1	
Mercur	Hg mg/l		0,001	
Plomb	Pb mg/l		0,05	
Hydrogène sulfuré	Non détectables organoleptiquement			
Sélénium	Se mg/l		0,01	
Zinc	Zn mg/l		5	
Facteurs d'intérêt biologiques				
Oxydabilité ou KMnO ₄	O ₂ mg/l	2	1	
Facteurs biologiques Valeurs maximales admissibles (N ^o de germes/100ml)				
Paramètres		VMA	Commentaires	
Coliformes totaux				
A - Eau transportée sous condition.				Désinfection efficace turbidité<NTU
a.1 - Eau désinfectée à l'entrée du système de distribution (0,1-Cl ₂ +1 mg/l)		0		pH=8 durée de contact = 30mn 0,2-Cl ₂ +0,5mg/l
a.2 - Eau non désinfectée à l'entrée du système de distribution		0-99% échant./l		3 occasionnellement (pas de 2 échant. consécutifs)
a.3 - Eau dans le réseau de distribution eau nécessairement désinfectée (0,1-Cl ₂ +1 mg/l)		0-99% échant./l		2 occasionnellement (pas de 2 échant. consécutifs)
B - Eau non transportée sous condition		10		
C - Eau embouteillée		0		Protection des usagers. Faire bouillir l'eau avant de la consommer
D - Eau approvisionnée en cas de catastrophes		0		
Coliformes fécaux				
A - Eau transportée sous condition.				Dans une eau traitée, le dénombrement des germes totaux effectué à l'entrée du réseau de distribution ne doit pas excéder 20 fois le taux obtenu en échant. de réseau excepté si les réservoirs de mise en charge dans 90% des échant./l sont analysés au cours de l'année.
a.1 - Eau désinfectée à l'entrée du système de distribution (0,1-Cl ₂ +1 mg/l)		0		
a.2 - Eau non désinfectée à l'entrée du système de distribution		0		
a.3 - Eau dans le réseau de distribution eau nécessairement désinfectée (0,1-Cl ₂ +1 mg/l)		0		
B - Eau non transportée sous condition		0		
C - Eau embouteillée		0		
D - Eau approvisionnée en cas de catastrophes		0		

Figure 34 : les normes marocaines relatives à la qualité des eaux d'alimentation humaine

➤ Légende :

VMR : Valeur maximal recommandée.

VMA : Valeur maximal admissible.

VmR : Valeur minimal recommandée.

les valeurs des analyses chimiques ne dépassent pas les valeurs maximales des normes marocaines relatives à la qualité des eaux de consommation. (une minéralisation moyenne de l'ordre de 455,1 mg/l et ne dépasse pas 1000mg/l) ; donc du point de vue qualité les eaux de ce barrages sont consommable.

III.7.2 : Qualité de l'eau destinée à l'irrigation :

L'eau joue un rôle très important dans le domaine agriculture, en effet, il assure :

- Le contact sol/racines
- La turgescence des tissus (jusqu'à 90%)

- Transport et échange de matière
- H₂O est partiellement métabolisée et
- Transpiration des plantes

Son efficacité nécessite une parfaite connaissance de la qualité de l'eau d'irrigation qui se rapporte principalement à la composition minérale de l'eau ou, à la présence de substances solides ou organiques dans le l'eau. Les propriétés chimiques et physiques (turbidité, présence d'algues, etc) déterminent l'aptitude de l'eau à être utilisée pour l'irrigation.

Les paramètres ou les propriétés chimiques qui déterminent la qualité de l'eau pour l'irrigation sont :

- La dureté de l'eau ; est essentiellement la somme des concentrations de calcium et de magnésium (nutriments essentiels pour les plantes) dans l'eau. (la dureté trop faible pourrait provoquer la corrosion du système d'irrigation).
- La salinité de l'eau ; un niveau de salinité trop élevé réduit la capacité de la plante à absorber l'eau, donc il y a une diminution des rendements, le flétrissement et la brûlure des feuilles et d'autres symptômes.
 - 0.05 dS/m à 0.4 dS/m : Très bonne qualité
 - 0.4 dS/m à 0.75 dS/m : Bonne qualité
 - 0.75 dS/m à 1.5 dS/m : Qualité médiocre
 - Au-delà de 1.5 dS/m : Très mauvaise qualité (Zébic et l'anivin, 2016)
- Ph ; influence la solubilité des sels minéraux. La plupart des nutriments sont disponibles à un ph compris entre 5,5 et 6,5
- Alcalinité de l'eau ; est la somme de l'acide carbonique (H₂CO₃), des bicarbonates (HCO₃) et des carbonates (CO₃²⁻) dans l'eau. C'est une mesure de la capacité de l'eau à résister au changement de ph. (très difficile d'abaisser le ph d'une eau à fort alcalinité, que celui d'une eau à faible alcalinité.)
 - 0 à 100 eq de carbonate : Risque faible de colmatage,
 - 100 à 200 eq de carbonate : Risque modéré,
 - Au-delà de 200 eq de carbonate : Risque sérieux. (Zébic et l'anivin, 2016)

- Le rapport entre le sodium, le calcium et le magnésium ; le SAR est un paramètre de qualité d'irrigation qui aide à estimer le potentiel du sodium, calcium et magnésium dans l'eau à absorber les particules du sol,

$$\text{SAR} = \text{Na} / (\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}) \quad \text{Exprimé en méq/L.}$$

La qualité du Sodium est classifiée selon les seuils suivants :

0 méq/L à 3 méq/L : Très bonne qualité

3 méq/L à 6 méq/L : Bonne qualité

6 méq/L à 9 méq/L : Qualité médiocre

Au-delà de 9 méq/L : Très mauvaise qualité

Pour notre cas on va calculer juste le SAR pour voir la qualité du Sodium dans les différentes stations d'échantillonnage dans le barrage Hassan II.

Tableau 13 : Représentation des résultats de calcule de SAR

Code	Na+	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SAR
BS1	0,957	2,221	2,227	0,22676817
BS2	0,957	2,202	2,158	0,22904344
BS3	1,130	2,175	2,187	0,27063287
BS4	1,304	2,170	2,189	0,3123741
BS5	1,130	2,179	2,228	0,26925706
BS7	1,130	2,156	2,170	0,27173745
BS8	1,130	2,187	1,835	0,28184368
BS9	1,130	2,187	2,164	0,27098784
BS10	1,130	2,156	2,199	0,27087464
BS11	1,130	2,199	2,186	0,26992613

Les résultats de calcule (Tableau 13) montre que toutes les eaux des stations d'échantillonnages sont de très bonne qualité chimique de l'eau destinée à l'irrigation ($0 \text{ méq/l} < \text{SAR} < 3 \text{ méq/l}$).

Conclusion Générale

L'étude bibliographique montre les différents types des barrages au Maroc et leurs caractéristiques générales dont le barrage Hassan II avec une description géographique et géologique de la zone d'étude (Haut Moulouya) ensuite une caractérisation hydrogéochimique.

En outre, L'étude analytique sur les eaux de barrage montre que l'un des facteurs principales de sa minéralisation est la lithologie de la zone d'étude on utilisant les ions majeures des eaux de la retenue du barrage, aussi elle montre que la minéralisation est contrôlée par une interaction eau-roche (D'après le diagramme de Gibbs).

L'étude menée au cours de l'élaboration de ce travail constitue une contribution qui permet d'apporter des nouvelles idées pour mieux comprendre la qualité hydrochimique des eaux de barrages Hassan. Ce lac réservoir est caractérisé généralement par l'existence d'un seul faciès important : c'est le faciès bicarbonaté calcique et magnésien qui donne une idée globale sur la lithologie du bassin versant de la Moulouya caractérisés par des faciès plus au moins carbonatés.

L'importance scientifique et socio-économique du barrage Hassan II est connue en tant que zones riches des ressources naturelles variées. Cependant ces milieux subissent des impacts qui ne cessent pas de s'accroître. En effet, les eaux de barrage Hassan II est l'un des réseaux hydrauliques marocains qui souffrent des activités anthropiques notamment par la contamination en éléments traces métalliques (ETM) dû aux déchets plombifères de la mines abandonnes Zeïda.

Notre étude hydrochimique montre que les eaux du barrage Hassan II ont une bonne qualité. Cependant pour évaluer la possibilité de contamination de ces eaux.il faut faire appel au analyses des éléments traces métalliques (ETM).

En matière de recherches scientifiques, elles ont sensiblement contribué à éclairer les gestionnaires sur l'intérêt de ces valeurs et de ces impacts, en effet elle en a résulté une prise de conscience qui s'est effectué par l'affectation d'un nouveau sujet pour traites les causes et donnés des recommandations et des solutions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE :

- AHAMROUNI, J., (1996). Erosion hydrique dans le bassin versant de la Moulouya (Maroc oriental). Recherche des zones sources d'envasement de la retenue du barrage Mohamed V. Thèse de troisième cycle en géologie appliquée, Université Cheikh Anta Diop. 190p.
- AMRANI.A, (2007) Apport des données couplées d'imagerie satellitaire ETM+ DE LANDSAT 7 et modèle numérique de terrain appliqués à l'étude morphogénétique de la haute et moyenne Moulouya (Maroc),
- BACHIR h, (2008), SM le roi inaugure le barrage Hassan II à Midelt, journal Aujourd'hui le Maroc.
- BADRAOUI.A et HAJJI.A, (2001) envasement des retenus de barrage, eau ressource aménagement environnement, 67/18545
- BENYASSINE .E.M & DEKAYIR.A (2013) Application du SIG et de l'imagerie radar à l'analyse morphologique et minéralogique du bassin versant de la Haute Moulouya (Maroc), Geo-Eco-Trop., 37, 2: 227-242
- BOUABDALI.A, SAIDI.N, M'BARET.S, ESCARRE.J et LEBLANC.M, (2005), Oued Moulouya : vecteur de transport des métaux lourds (Maroc), revue des sciences de l'eau journal of water science, (2005),.
- CHAHBOUNE M.*, CHAHLAOUI A., ZAID A., BEN MOUSSA A.
Contribution à la caractérisation physicochimique des eaux du lac réservoir du barrage Hassan II (province de Midelt, Maroc)
- CHAHBOUNE.M, CHAHLAOUI, ZAID A, Ben moussa A, (2013) contributions à l'étude de l'état trophique du barrage Hassan II (province de Midelt, Maroc) 10p
- CHAOUI .M,(2013) Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et métallique des eaux de surface (Oued Moulouya/Barrage Hassan II) au voisinage de la mine abandonnée Zeïda (Haute Moulouya)
- CHILLASSE.L, DAKKI.M et ABBASSI.M,(2001). Valeurs et fonctions écologiques des zones humides du moyen Atlas(Maroc) ; Humedales, Méditerranéens pp.13146
- COMBE, M. &, SIMONOT, M., (1971). La Haute Moulouya, le sillon d'Itzer-Enjil et le massif de Bou-Mia Aouli. Ressources en eau du Maroc (Tome1). Domaine du Rif et du Maroc oriental. Notes et Mém. Serv. Géol., Maroc : 193-201
- DAGALLIER, G., (1977). Une série carbonatée littorale : le Lias moyen à Pb-Ba de Mibladen (Maroc). Sciences de la terre, 21 : 53-101

- DERRAR, N., (1996). Synthèse géologique et hydrologique de la Haute et la Moyenne Moulouya (Maroc). Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale de l'Industrie Minérale, Rabat, Maroc. 169p.
- Direction générale de l'eau, 2019
- EL AZHARI.A, RHOJJATI.A, EL HACHIMI.M.L, AMBROSIC.J.A,(2017) Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco
- EL GHOMARI Kh, (2015), Bilan de la politique de l'eau au Maroc.
- EL HACHIMI, M.L., (2006). Pb et As dans des eaux alcalines minières : contamination et risques (mine abandonnée de Zeida, Maroc). Rev. des sciences de l'eau, 20 : 1-13
- EL HAMAIDI. A(2020), Article 2020-ElHmaidi-Talhaoui IQE ESJ .
- EL HANNANI.M, TAIBI.A, BOUMEAZA.T. (2015), Hal Dynamique morpho-paysagère du bassin versant moyen de l'oued Moulouya et impact sur l'envasement des barrages (Maroc), p14.
- EMBERGER, A., (1965). Carte polygénétique des minéralisations plombifères de la Haute Moulouya (gisements d'Aouli, Mibladen et Zeïda), Maroc. C. R. Acad. Sci. Paris, 160 : 3433-3436 Environ Risque Sante – Vol. 18, n8 3, mai-juin (2019).
- FELENC, R. & LENOBLE, J.P., (1965). Les gîtes de plomb de Mibladène. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 181 : 186-196
- Jacques Azam, (2019) Sciences et technologie.
- JAOUHARI.M, (2018) Envasement des barrages : la capacité de retenue amputée de 75 millions de m3 chaque année.
- Haute Moulouya. Maroc. Bull. Soc. Géol. France, 166 : 15-22.
- HEMRIQUI.M,(2009)Contrôle de la Qualité des eaux naturelles de la région de KhmissDades (Ouarzazate, Maroc), 42p
- HOEPFFNER, C., (1987). La tectonique hercynienne dans l'Est du Maroc. Thèse ès Sciences, Université de Strasbourg. 280p
- Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°14, Juin 2013, pp. 61-77
© 2013 Tous droits réservés
- LAMRI.D et BELGHYTI.D. « Bio-évaluation de la qualité des eaux par application des indices biotiques : Cas de l'Oued Moulouya (Maroc) ».
- LKEBIR .N,(2012/2013) Comportement hydrochimique, qualité des eaux et cartographie de quelques minéralisations au voisinage de la mine de Hajjar (Plaine du Haouz, Maroc),102p
- LAVILLE.E, FEDDAN.B, PIQUE.A,(1991), Déformation synschisteuse jurassique, orogénèse cénozoïque : deux étapes de la structuration du haut Atlas (Maroc)

- MABROUKI.Y, TAYBLI.A.F, CHAVANON.G, VINCON.G, BERRAHOU.A, (2016),
Contribution à l'étude des plécoptères dans le Maroc oriental et le bassin versant de
la Moulouya et leur distribution en fonction des étages bioclimatiques.
- MICHARD, A., (1976). Eléments de géologie marocaine. Notes et mém, Serv. Géol du
Maroc, Rabat, 252p
- Ministère de l'équipement du transport de la logistique et de l'eau 2019
- NAJI, M., (2004). Les minéralisations plombo-barytiques du district de la Haute
Moulouya : contexte géologique, contrôle tectonique et modèle de mise en place
gisements d'Aouli – Mibladène, Maroc. Thèse en géologie appliquée. Université
Mohammed V. Rabat. 218p.
- OUKEMENI, D., BOURNE, J. & KROGH, T. E., (1995). Géochronologie U-Pb sur
Zircon du Pluton d'Aouli.
- QUINQUIS.M, (2017) relation entre bassin versants et cellules sédimentaires littorales :
les exemples du Maroc, de l'ALGERIE et de la TUNISIE. 313p
- RAHOUI.M, (2003), « diagnostic de l'état actuel de la gestion des déchets solides dans
quatre villes du bassin versant de la Moulouya : Midelt, Guersif, Taourirt et
Berkane », Acte de l'atelier de formation technique sur la gestion des déchets solides
municipaux.
- SAADIZ, (2012). Les bassins Triasico-Jurassique de la haute et de la Moyenne
Moulouya et de la bordure méridionales du Moyen Atlas (Maroc) : Contexte
sédimentaire et marqueurs géodynamiques. Thèse de doctorat d'état es Sci, Univ.
Mohamed V- AGDAL, Fac. Sci Rabat, 347p
- SCHMITT, J.M., (1976). Sédimentation, paléaltération, géochimie et minéralisation en
plomb de la série triasique de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc). Thèse en sciences
et techniques minières.
- SNINEH.M,(2013) Apport des méthodes géophysiques et des analyses hydrochimique à
la reconnaissance de l'hydrogéologie de la région de Kettara (jebilets centrales,
Maroc), p133

Webographie:

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrochimie>

<http://wikhydro.developpement->

[durable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:Barrages en terre homog%C3%A8ne ou pseudo-zon%C3%A9s](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Wikibardig:Barrages_en_terre_homog%C3%A8ne_ou_pseudo-zon%C3%A9s)

<http://www.equipement.gov.ma/>

<http://81.192.10.228/patrimoine/barrages/barrages-existants/#1454512926070-7b2df003-671d>