



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



Université Hadj Lakhdar –Batna

Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture

Département D'Hydraulique

Mémoire de Magister en Hydraulique

Option : Hydraulique numérique et environnement

Présenté par:

MEKAOUSSI NADIA

Pour obtenir le diplôme de magister en Hydraulique

COMPORTEMENT DES ELEMENTS CHIMIQUES DANS LES EAUX DE SURFACE DE HAMMAM DEBAGH (EST ALGERIEN)

Sous la direction de : Mr. BOUDOUKHA Abderrahmane

Mémoire soutenu le : 30 / 01 /2014

Devant le jury composé de :

Jury	Grade	Affiliation	Qualité
Mr. BOUHOUFANI Tarek	MCA	Université de Batna	Président
Mr. BOUDOUKHA Abderrahmane	Pr	Université de Batna	Rapporteur
Mr. HOUICHI larbi	MCA	Université de Batna	Examinateur
Mr. BENKADJA Rachid	MCA	Université de Msila	Examinateur

INTRODUCTION

GENERALE

De toutes les planètes du système solaire, la Terre est la seule à être pourvue d'une hydrosphère, celle-ci recouvre plus de 70% de sa superficie (Blieft et Perraud, 1990). Schématiquement, l'eau évolue entre trois secteurs : les océans (l'hydrosphère), l'atmosphère et le sol (lithosphère). La Terre recevant l'énergie solaire, l'hydrosphère chauffée s'évapore, conduisant à la présence d'eau dans l'atmosphère. Cette eau, suite à un refroidissement de l'air, se condense en gouttes ou cristaux de glace et se retrouve précipitée sous forme de pluie, neige ou grêle sur la lithosphère à la surface. Le fonctionnement de ce système conduit à définir différents types d'eau, d'usage et de composition différente. (Boeglin, 2001).

Une partie non négligeable du cycle de l'eau à la surface de la Terre, entre la pluie et les cours d'eau, ruissèle sur le sol. Au cours du trajet de l'eau, diverses réactions se produisent entre la phase aqueuse, la phase gazeuse et les phases solides, minérales et organiques qui influencent la composition chimique de la phase aqueuse.

L'eau de surface englobe toutes les eaux circulants ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Cette composition se trouve également modifiée suite à l'évaporation intense au niveau des plans d'eau libre. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets jetés dans le milieu aquatique et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. Ceci rend les eaux rarement potables avant traitement (Degremont, 1989).

En Algérie comme dans la plupart des pays en voie de développement ou industrialisés, la dégradation de la qualité de l'eau aussi bien de surface que souterraine est de plus en plus préoccupante. A l'échelle d'une unité fonctionnelle (bassin versant), les processus de transfert et les interactions entre l'eau et les différents systèmes (géologique, pédologique, climatique, anthropique,) sont très divers et très complexes. Ces

phénomènes hydrochimiques aboutissent à un faciès qui reflète l'environnement géochimique de la région.

L'évaluation et la caractérisation des ressources en eau de surface et souterraine en Algérie, la pollution et les impacts des risques hydrologiques sont au cœur de la problématique de plusieurs recherches. Les aspects qualitatifs et quantitatifs sont abordés en s'appuyant sur la chimie des eaux et l'hydrologie. Notre travail rentre dans cette perspective qui sera abordé de la manière suivante :

1^{ere} partie : Analyse bibliographique au cours du quelle sera abordé l'origine et l'impact des différents éléments chimiques présents dans l'eau de surface.

Les conditions naturelles du bassin versant seront abordées en mettant l'accent sur la géologie, la géomorphologie et sur les paramètres climatiques du bassin versant de oued Bouhamdene situé dans la région de Guelma dans l'Est algérien.

2^{ème} partie : L'aspect hydrochimique sera traité dans la dernière partie de ce travail et qui constitue la phase la plus importante.

Chapitre I

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la distribution et la circulation des composés chimiques des eaux. Elle étudie la pollution des milieux aquatiques qui est devenue une science au vu de leur complexité (Stumm et Morgan, 1981). L'hydrochimie a de nombreuses applications telle que l'origine d'une eau, sa qualité, ... etc (Ronald, 2005).

I. Les paramètres physico-chimiques de l'eau

Ces paramètres, font l'identité de base de l'eau et sont essentiellement représentés par les sels minéraux (calcium, sodium, potassium, magnésium, sulfates...) ou par des indicateurs plus globaux comme :

- la conductivité électrique, qui permet d'avoir une idée sur la salinité de l'eau,
- le titre alcalimétrique, qui permet d'apprécier la concentration de tous les carbonates et bicarbonates dans l'eau,
- le potentiel d'hydrogène qui représente le degré d'acidité ou d'alcalinité de l'eau contrôlant la plupart des réactions chimiques.

I.1. Les paramètres physiques

I.1.1. La température (T)

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz, donc sur la conductibilité. Elle permet de différencier entre les eaux qui circulent en profondeur et celles qui circulent près de la surface (Philippo et al., 1981). La température est le facteur cinétique le plus important de toutes les réactions chimiques et biologiques dans les milieux aquatiques ; une température supérieure à 15°C favorise le développement des microorganismes, intensifie la biodégradation et les mauvaises odeurs (Beaudry et Henry, 1984).

I.1.2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les composés organiques sont de mauvais conducteurs. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par cm (mS/cm) à 20 °C. La CE d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µS/cm (Beaudry et Henry, 1984).

I.1.3. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH correspond, pour une solution donnée, à la concentration d'ions d'hydrogène et exprime l'acidité ou l'alcalinité d'une eau. L'échelle des pH s'étend de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) ; la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C. Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés (Beaudry, 1984). Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons (Lounnas, 2008).

I.2. Principaux éléments présents dans l'eau

I.2.1. Cations majeurs

I.2.1.1. Calcium (Ca⁺⁺)

Le calcium est le cinquième élément le plus abondant dans la nature. C'est un élément alcalinoterreux, il se trouve dans les eaux thermo-minérales circulant en milieu calcaire et aussi en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonate (CaCO₃). Le calcium peut provenir également des formations gypsifères (CaSO₄, 2H₂O), qui sont facilement solubles (George et Harrap, 1963). Il est le composant majeur de la dureté de l'eau et l'élément dominant des eaux naturelles. La concentration du calcium dans l'eau dépend du temps de séjour de l'eau dans des formations géologiques riches en calcium (Beaudry et Henry, 1984). Lorsque sa teneur dans l'eau dépasse la norme, il provoque l'entartrage dans les canalisations. Les eaux minérales contiennent plusieurs dizaines de

milligrammes par litre. L'organisation mondiale de la santé « OMS » recommande pour l'eau destinée à la consommation humaine une valeur limite de 500 mg/l.

I.2.1.2. Magnésium (Mg^{++})

Le magnésium se place au huitième rang parmi les éléments naturels les plus abondants dans la nature. Il constitue 2,5% de la croûte terrestre et forme généralement des roches comme la giobertite (“magnésite”), la dolomie, l'olivine, la serpentine, le talc et l'amiante (Ministère de l'Environnement de l'Ontario, 1976). Les principales sources du magnésium contenu dans ces eaux sont les minéraux ferromagnésiens des roches ignées et les carbonates de magnésium des roches sédimentaires (George et Harrap, 1963). Dans les régions riches en roches magnésiques, l'eau peut contenir des concentrations de 10 à 50 mg/l de cet élément. Les sulfates et les chlorures de magnésium sont très solubles et l'eau en contact avec leurs gisements peut contenir plusieurs centaines de milligrammes de magnésium par litre (Becker et Durfor, 1972). C'est aussi un élément de la dureté de l'eau dont la teneur dépend des terrains traversés. Indispensable pour la croissance, il intervient comme élément plastique dans l'os et comme élément dynamique dans les synthèses enzymatiques et hormonales. Les concentrations de magnésium ne sont pas tellement dépendantes des activités humaines, donc le magnésium n'est pas utilisé comme indicateur de stress lié à la pollution. Son apport journalier nécessaire à l'adulte est de 200 à 300mg. Toutefois, à partir de certaines teneurs, il donne à l'eau une amertume désagréable (Rodier, 1975).

I.2.1.3. Sodium et potassium (Na^+ et K^+)

Le sodium et le potassium, 6^{ème} et 7^{ème} éléments les plus abondants à l'état naturel, sont en proportions très variables. On peut également signaler que le sodium joue un rôle important en agriculture, pour l'irrigation, du fait de son action sur la perméabilité des sols. Le sodium provient du lessivage des formations riches en NaCl, des formations argileuses, argilo-marneuses et des rejets des eaux usées d'origine domestique (Beaudry et Henry, 1984). Le sodium est, après le chlore, le deuxième élément dissous le plus abondant dans l'eau de mer (Reinberg, 1971). Le potassium beaucoup moins abondant que le sodium et

rarement présent dans l'eau à des teneurs supérieures à 20 mg/l. Il ne représente aucun inconvénient particulier bien que le K soit une des sources possibles de radioactivité de l'eau (Potelon et Zyman, 1998). Le sodium est nécessaire à l'homme pour maintenir l'équilibre hydrique de l'organisme. Il est aussi nécessaire pour le fonctionnement des muscles et des nerfs. Trop de sodium peut endommager nos reins et augmenter les risques d'hypertension artérielle (Reinberg, 1971).

I.2.2. Anions majeurs

I.2.2.1. Chlorures (Cl^-)

L'eau contient toujours des chlorures en proportion très variable, les eaux provenant des régions granitiques sont pauvres en chlorure alors que les eaux des régions sédimentaires en contiennent davantage (Beaudry et Henry, 1984). Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines et sont liés principalement à la dissolution des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très faciles d'où leurs présences en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses (Beaudry et Henry, 1984). Ainsi, ils peuvent provenir également de l'action humaine à partir du soulage des routes, ou par contamination par les eaux usées. Les chlorures donnent un goût désagréable et posent le problème de la corrosion dans les canalisations et les réservoirs à partir de 50 mg/l (OMS, 2011). Dans l'eau potable, la concentration maximale acceptable est de 250 mg/l. Si la teneur est supérieure à cette valeur, elle affecte le goût de l'eau. Une concentration élevée de Cl^- peut provoquer l'eczéma et l'érythème (Beaudry et Henry, 1984).

I.2.2.2. Bicarbonate (HCO_3^-)

Sel dérivé de l'acide carbonique à teneur réduite en hydrogène et contenant deux fois plus d'acide que le carbonate. La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire, dolomie ...) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO_2) (Belhadj, 2006).

I.2.2.3. Les sulfates (SO_4^{2-})

Les eaux naturelles contiennent pratiquement toujours des sulfates, en proportion très variables. Leurs présences résultent de la solubilité du sulfate de calcium des roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches (les pyrites). La forte concentration en sulfates provoque de troubles gastro-intestinaux; aussi elles peuvent donner un goût désagréable (Beaudry et Henry, 1984). L'organisation mondiale de la santé recommande comme valeur limite 250 mg/l. L'union européenne indique un niveau guide de 25 mg/l et une concentration maximale admissible de 250 mg/l (Ahonon, 2011).

I.2.2.4. Les phosphates (PO_4^{3-})

Les phosphates font partie des anions facilement fixés par le sol, leur présence dans les eaux naturelles est liée à la nature des terrains traversés et à la décomposition de la matière organique (Beaudry et Henry, 1984). Le phosphate c'est un élément essentiel à la vie aquatique. Les fortes concentrations en phosphates rencontrées dans l'estuaire indiquent un enrichissement d'origine domestique et agricole, ainsi que des apports directs des activités industrielles. Les phosphates sont considérés comme principal responsable du phénomène d'eutrophisation des eaux de surface. Avec l'azote, les phosphates forment les nutriments qui contribuent au développement du plancton végétal printanier. (Hakmi, 2006).

I.2.3. Éléments indicateurs de pollution

I.2.3.1. Les éléments nutritifs:

On trouve l'azote à l'état naturel dans l'air, l'eau et le sol. L'élément azote est un élément indispensable à tous les organismes vivants, il est constamment recyclé dans l'environnement grâce à divers processus: fixation, assimilation, ammonisation, nitrification, dénitrification...etc., c'est un cycle qui transforme chimiquement l'azote en nitrate, nitrite, ammoniac ou en substance organique. Les effets sur l'environnement varient selon ses formes, dont la présence dans le fumier dépend d'un certain nombre de conditions : nature et durée de l'entreposage, nature des épandages, température,...etc (Kemoukh, 2007).

I.2.3.1.1. Les nitrates (NO_3^-)

Les nitrates sont des ions naturels présents partout dans l'environnement. Ils sont le produit de l'oxydation de l'azote (qui représente 78% de l'atmosphère) par les microorganismes dans les plantes. Le nitrate est la forme oxydée de l'azote qui est la plus stable, mais il peut être réduit en nitrite, modérément réactif, par action microbienne. Le nitrate étant un sel très soluble dans l'eau, très mobile dans le sol, pénètre dans la nappe phréatique lorsque sa quantité dépasse ce que les plantes peuvent utiliser. (Kemoukh, 2007).

I.2.3.1.2. Les nitrites (NO_2^-)

Les nitrites constituent le stade intermédiaire entre les ions ammonium (NH_4^+) et les nitrates. Peu stable en rivière, on ne les rencontre que lorsqu'il existe un déséquilibre au niveau de l'oxygénation ou de la flore bactérienne de la rivière. (Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau, 2010).

I.2.3.1.3. Ammonium NH_4^+

On trouve l'azote ammoniacal (NH_3 et NH_4^+) dans les eaux polluées à cause de la biodégradation des protéines des acides aminés de l'urée ; sa présence indique une pollution récente, il est graduellement oxydé en nitrites, puis en nitrates (Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau, 2010).

La présence d'ammonium en quantité importante est l'indice d'une contamination par des rejets d'origine humaine ou industrielle. Les urines humaines ou animales contiennent en effet de grandes quantités qui se transforment rapidement en ammoniaque. Ce paramètre est souvent utilisé comme traceur des eaux usées domestiques (Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau, 2010).

I.2.3.2. L'oxygène dissous (O_2)

Les concentrations en oxygène dissous constituent, avec les valeurs de pH, l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous

en matières organiques biodégradables et donc, dans une certaine mesure, sa qualité ou son degré de pollution. La dégradation complète de la matière organique peut être relativement longue (plusieurs semaines). D'autre part, l'oxydation des dérivés ammoniacaux et des nitrites en nitrates (nitrification) absorbe également de l'oxygène. Cette nitrification, dans les eaux naturelles, ne débute qu'au bout d'une dizaine de jours. Pour ces deux raisons, on mesure la DBO en 5 jours, ou DBO₅, c'est-à-dire la quantité d'oxygène consommée pendant ce laps de temps, pour l'oxydation partielle des matières organiques biodégradables sous l'action des microorganismes ; elle s'exprime en milligrammes d'oxygène par litre (mg O₂/l) (Beaudry et Henry, 1984 ; Degremont, 2005; Marcel, 1995).

I.2.3.4. La demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO est la quantité d'oxygène consommée par les matières oxydables dans des conditions de l'essai. Contrairement à la DBO₅ où l'oxydation se fait lentement par l'activité des microorganismes, l'oxydation, pour la DCO, est provoquée à l'aide d'un puissant oxydant (bichromate de potassium) en milieu acide fort (H₂SO₄) et au reflux pendant deux heures. Alors que la DBO₅ ne mesure que la matière organique naturellement dégradable (Beaudry et Henry, 1984). La DCO permet de quantifier la majeure partie de la matière organique biodégradable. C'est pourquoi les valeurs de DCO sont nécessairement supérieures aux valeurs de la DBO₅. Le rapport DCO/DBO₅ permet d'évaluer le caractère biodégradable de la matière organique (le rapport à peu varier entre 1,5 et 2). (Marcel, 1995).

I.2.3.5. La matière en suspension (MES)

La matière en suspension rencontrée dans les eaux (essentiellement superficielles) est très diverses ; elle correspond à toutes la matière minérale ou organique insoluble dans l'eau. Elle inclue les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres micro-organismes aquatiques (Lounnas, 2008). La quantité de matières en suspension varie notamment selon les saisons et le régime d'écoulement des eaux, la nature des rejets, etc.... Ces matières affectent la transparence de

l'eau et diminuent la pénétration de la lumière et, par suite, la photosynthèse. Elle peut également gêner la respiration des poissons. Par ailleurs, la matière en suspension peut contenir des quantités élevées de matières toxiques (métaux, pesticides, huiles minérales, hydrocarbures aromatiques polycycliques...) la matière en suspension est exprimée en mg/l. (Marcel, 1995)

I.2.3.6. Le résidu sec (RS)

C'est la mesure de la quantité de matières minérales dissoute dans l'eau. Il donne une indication du degré de minéralisation de l'eau. Le résidu sec est obtenu après évaporation de l'eau à 180°C (Marcel, 1995). Le résidu sec donne une information sur la teneur en substances dissoutes non volatiles. Suivant le domaine d'origine de l'eau, cette teneur peut varier de moins de 100 mg/l (eaux provenant de massifs cristallins) à plus de 3 000 mg/l. L'eau peut être classée selon le résidu sec de la manière suivante (Tableau I-1) :

Tableau 1: Classification des eaux selon le résidu sec. (Lounnas, 2008)

RS	< 50mg/l	50 à 500 mg/l	500 à 1500 mg/l	> 1500 mg/l
Type d'eau	très faiblement minéralisée	eau faiblement minéralisée	moyennement minéralisée	*fortement minéralisée, dite « de cure »

*à consommer pendant une durée limitée

I.3. Pollution des eaux

Les exigences de l'homme vis-à-vis de l'eau qu'il consomme dans ses diverses activités vont en croissant, tant au point de vue de la qualité que de la quantité. Il dispose de réserves naturelles superficielles et souterraines, souvent mal réparties. Il a commis l'imprudence de laisser polluer ses ressources locales par des déchets, le plus souvent biodégradables, mais parfois toxiques, provenant de sa vie domestique, agricole et industrielle. A l'échelle d'une unité fonctionnelle (bassin versant), la dégradation de la qualité de l'eau varie selon le bassin versant (milieu physique, structure paysagère, système agricole), l'histoire agricole passée et actuelle du bassin versant (stock de nutriments ou de polluants constitué, pratiques actuelles) et le régime

climatique (climat des années antérieures, de l'année en cours, caractéristiques de l'averse). (Gril et Dorioz, 2004).

Ainsi, la pollution des eaux peut être définie comme une dégradation de celle-ci par les éléments qu'elle a accumulés de son utilisation. Ces éléments indésirables proviennent des excréments chimiques, des rejets provenant d'industries divers, du lessivage des terrains traversés. Le problème de la pollution des eaux représente sans aucun doute l'un des aspects les plus inquiétants de la dégradation du milieu naturel (Lounnas, 2008).

I.3.1. Origine de la pollution

I.3.1.1. L'industrie

Les activités industrielles rejettent un bon nombre de substances qui vont polluer nos rivières et nos nappes, parfois d'une manière intensive que l'on n'en connaît pas les effets à long terme. Les rejets industriels renferment des produits divers sous forme insoluble ou soluble d'origine minérale et/ou organique, à caractère plus ou moins biodégradable et parfois toxique même à très faible concentration (Boeglin, 2001).

I.3.1.2. L'agriculture

Elle utilise des engrais chimiques azotés et phosphorés, des produits phytosanitaires destinés à protéger les cultures. Ces produits parfois toxiques lorsqu'ils sont utilisés en excès vont contaminer en période de pluie, les eaux de surface et les eaux souterraines par infiltration (Djabri, 1996).

I.3.1.3. Pollution domestique

Nos eaux usées urbaines sont constituées de matière organique biodégradable certes mais de grandes consommatrices d'oxygène, de germes pathogènes et de produits chimiques (Becker et Durfor, 1972).

I.3.1.4. Pollution par les eaux pluviales

Il ne faut pas oublier par ailleurs la pollution générée par les eaux pluviales. L'eau de pluie se charge d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles) (Lounnas, 2008).

I.3.1.5. Pollution d'origine naturelle

Certaines substances naturellement présentes dans l'environnement entraînent parfois des problèmes de contamination de l'eau potable. Des composés inorganiques comme le baryum, l'arsenic, les fluorures, le sodium, les chlorures, le mercure, le cadmium et les cyanures peuvent contaminer l'eau potable. L'eau souterraine est particulièrement vulnérable lorsqu'il y a présence de métaux dans les formations géologiques environnantes (Djabri, 1996).

I.3.1.6. Pollution par les substances associées au traitement de l'eau

La chloration de l'eau dans le but de la rendre potable est un procédé très répandu et reconnu efficace. La chloration est même considérée par les experts comme étant l'une des plus importantes initiatives de santé publique du XX^e siècle. Cependant, bien qu'il soit efficace pour contrôler principalement les virus et les bactéries, le chlore, en présence de matières organiques, entraîne la formation de plusieurs sous-produits de chloration (SPC) potentiellement cancérigènes comme par exemple les trihalométhanes (THM) (Lounnas, 2008). Le sulfate d'aluminium est un produit utilisé pour coaguler les substances contenues dans l'eau. L'eau ainsi traitée présente des concentrations d'aluminium plus élevées que dans l'eau non traitée. La toxicité de l'aluminium a été étudiée en relation avec la maladie d'Alzheimer qui influe sur la mémoire et le comportement des personnes atteintes (Lounnas, 2008).

I.3.2. Les principaux polluants des eaux naturelles

I.3.2.1. Polluants physiques

La pollution physique représente les éléments solides entraînés par l'eau. Ils se subdivisent en plusieurs catégories selon leur nature et leur dimension.

I.3.2.1.1. Les éléments grossiers

Leur dimension est suffisamment grande pour être retenue par de simples grilles. Dans les eaux de surface, ces éléments sont en général : les brindilles, les feuilles, les arbres...etc (Lounnas, 2008).

I.3.2.1.2. Les sables

Les sables sont des particules minérales d’une certaine dimension. Ils sont généralement à base de silice ou de composition minérale équivalente. Leur masse spécifique est de 2,5 à 2,6 g/cm³, ce qui permet leur élimination par simple décantation (Mizi ,2006).

I.3.2.1.3. La matière en suspension (MES)

La matière en suspension rencontrée dans les eaux (essentiellement superficielles) sont très diverses tant par leur nature que leur dimension .Elles sont constituées de quartz, d’argiles, de sels minéraux insolubles, de particules organiques composées de micro-organismes, et de produits de dégradation animaux ou végétaux (Marcel, 1995).

Selon leur dimension : L’état dispersé (en suspension et colloïdal), se distingue de l’état dissout, notamment par les dimensions particulières. La Figure (1) donne en première approximation, une échelle de dimensions particulières et les états correspondants.

Selon leur nature : La nature de la matière solide en suspension peut être soit minérale soit organique. Les polluants minéraux constituent une gêne physique pour l’environnement mais n’évoluent pas dans le temps. Les rejets minéraux colmatent les sols sur lesquels ils sont évacués aboutissant ainsi à l’asphyxie de ce sol ou contribuent à une pollution par leur volume (dépôts). Les polluants organiques qui ont besoin d’oxygène, évoluent et dégageront des odeurs par putréfaction. Dans ce cas, le métabolisme continu, et leur rejet qui gêne l’environnement ; ces éléments doivent être traités avant leur évacuation (Mizi ,2006).

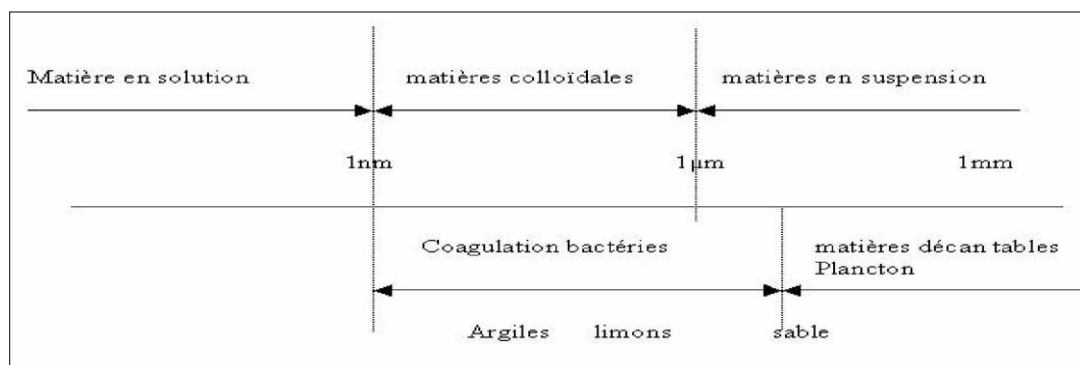


Figure 1 : Etats dispersés- états dissous. D’après (Marcel, 1995).

I.3.2.2. Polluants chimiques

La pollution chimique d'une eau est plus complexe et peut avoir plusieurs sources (Lounnas, 2008). On distingue selon la nature de la pollution chimique :

- Les éléments chimiques minéraux.
- Les éléments chimiques organiques.

I.3.2.2.1. Les éléments chimiques minéraux

L'eau étant un très bon solvant, permet la mise en solution de nombreux composés avec lesquels elle sera en contact. La dissolution des sels, la corrosion des métaux et dissolution des acides et des bases sont des phénomènes qui donnent lieu à des eaux de rejets caractérisées par certaines formes de pollution dont les plus représentatives sont (Lounnas, 2008) :

- La température

L'évolution de la température dépend du mode d'utilisation de l'eau avant son rejet et surtout le parcours de l'eau avant l'exutoire ou la station d'épuration. En général l'eau doit être évacuée vers l'environnement à des températures inférieures à 30°C. Une eau plus chaude constitue une pollution (Seghiri, 1996).

- Le pH

Le pH d'une eau est dû à la concentration de cette eau en ions H^+ ou OH^- . Une eau équilibrée aura un $pH=7$. Des variations trop élevées du pH par rapport à cette valeur moyenne de 7 constitue une pollution. Des eaux dont le pH présente de grands écarts par rapport à la neutralité, sont polluées (Seghiri, 1996).

- Les sels :

Dans beaucoup de procédés de production ainsi que lors de l'élaboration des matières, il se forme parfois des sels en grandes quantités, comme les chlorures, les nitrates, les sulfates et les phosphates, qui ont une grande importance vis-à-vis l'environnement (Bliefirt et Robert, 1990).

➤ **Les nitrates (NO_3^-)**

Les nitrates sont présents naturellement dans les eaux, les apports excessifs ou mal maîtrisés d'engrais azotés provoquent une augmentation des nitrates dans la ressource. Les nitrates se transforment en nitrite dans l'estomac. Ces nitrites peuvent provoquer la transformation de l'hémoglobine du sang en méthémoglobine, impropre à fixer l'oxygène. Ce phénomène est à l'origine de cyanoses, notamment chez les nourrissons. La consommation d'eau chargée en nitrates ou nitrites par la femme enceinte (ou le nourrisson) peut constituer un risque pour le nouveau né (Malenfant et al., 1995).

➤ **Les chlorures**

En plus de l'agressivité et de la minéralisation qu'ils confèrent à ces eaux, des taux élevés modifient la saveur de l'eau et contribuent aux dépôts de sels néfastes pour l'agriculture (Mizi, 2006).

➤ **Les sulfates (SO_4^{2-})**

En plus des inconvénients qui caractérisent les chlorures, les sulfates participent au métabolisme des bactéries contenues dans l'eau. Les bactéries sulfato-réductrices transforment les sulfates en sulfures avec dégagement de gaz sulfureux créant des désagréments pour l'environnement (Mizi, 2006).

- **Les métaux lourds**

Les métaux lourds, qui parviennent dans les eaux, font partie des polluants de l'eau. Les métaux lourds existent sous formes dissoute et en suspension ainsi que sous une forme difficilement soluble dans les sédiments (Blieft et Perraud, 1990).

I.3.2.2.2. La matière organique

La matière organique est principalement issue de la décomposition des végétaux, des animaux et des microorganismes. Il est donc difficile d'en donner une description précise ou une composition moyenne. Elle participe à beaucoup de paramètres de qualité de l'eau : couleur, sous-produits de désinfection, odeurs, saveurs...etc (Lounnas, 2008).

I.3.2.3. Polluants microbiologiques :

L'eau peut contenir des micro-organismes pathogènes (des virus, des bactéries, des parasites). Ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (Lounnas, 2008).

Conclusion

La concentration de ces différents paramètres physico-chimiques évolue avec l'écoulement de surface ce qui nécessite une étude de ces écoulements en liaison directe avec les paramètres chimiques.

Chapitre II

GEOLOGIE

Introduction

La composition chimique des eaux superficielles, est liée aux produits solubles de l'altération des roches. Pour une meilleure connaissance des différentes caractéristiques chimiques de cette eau, il est indispensable de donner un aperçu plus ou moins détaillé sur l'aspect géologique du terrain.

La géologie est une partie très importante dans toute étude hydrologique et hydrochimique. Ainsi, la lithologie, la tectonique et la structure géologique jouent un rôle primordial sur la qualité des eaux suite à la dissolution des minéraux se trouvant dans la roche et sur la quantité d'eau qui ruissèle ou s'infiltré. Ces paramètres sont conditionnés par la perméabilité du terrain.

II.1. La Situation Géographique

Le barrage de Hammam Debagh est situé au Nord Est algérien, à 20 km à l'Ouest de la ville de Guelma. Il est implanté à 3 km à l'amont de la localité de Hammam Debagh. Le barrage a été construit sur Oued Bouhamdene et son bassin versant a une surface de 1105 km² à Mdz Mamar. Il se trouve dans l'Atlas Tellien orientale; appartient au grand bassin versant de la Seybouse qui couvre une superficie plus de 6470 Km². (Annuaire hydrologique, 1993), (Figure II-1).

II.2. Le cadre géologique et lithologique

II.2.1. Les formations lithologiques

La lithologie du bassin versant de l'oued Bouhamdene est complexe. Elle présente des variations de résistance et de faciès allant des roches les plus dures représentées par les roches calcaireuses et gréseuses, aux roches les plus tendres marneuses.

Sur l'extrait de la carte des grands ensembles lithologiques et des formations superficielles, (Aiche, 1996) (Figure II-2) on peut regrouper trois ensembles (Tableau II-1):

II.2.1.1. Les roches résistantes

Elles regroupent dans le bassin, les calcaires de la nappe néritique de Constantine, les conglomérats et les grès numidiens. Elles caractérisent les reliefs les plus imposants, avec de fortes pentes. Les calcaires à moindre degré les grès portent les traces de l'action du froids pendant le quaternaire fissurés et par conséquent très perméables. Ces faciès couvrent respectivement 4.01, 4.06 et 26.90% de la surface de l'ensemble des affleurements rocheux.

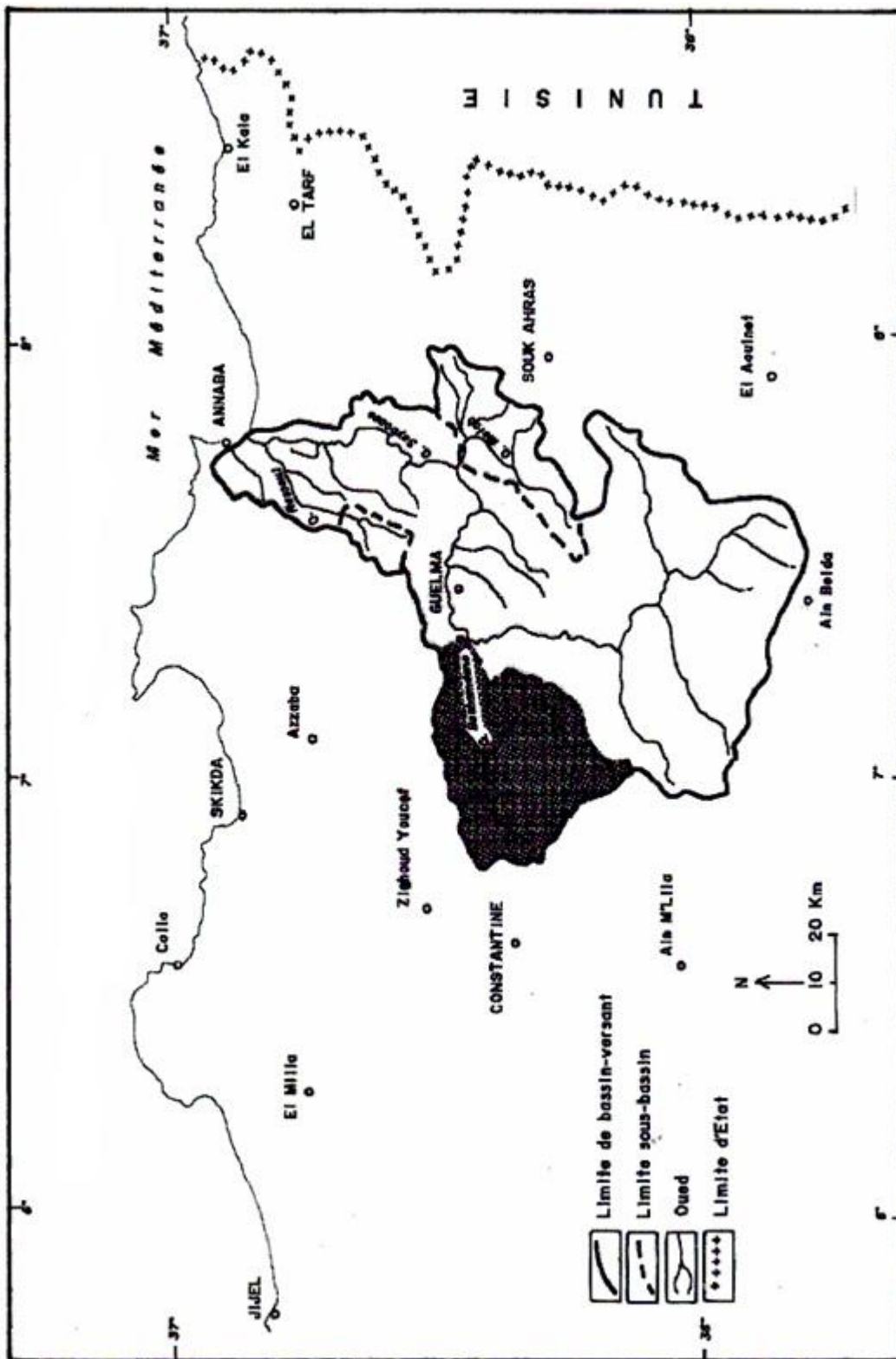


Figure II-1 : Localisation géographique du bassin versant de Oued Bouhamdene (Bassin de la Seybouse)

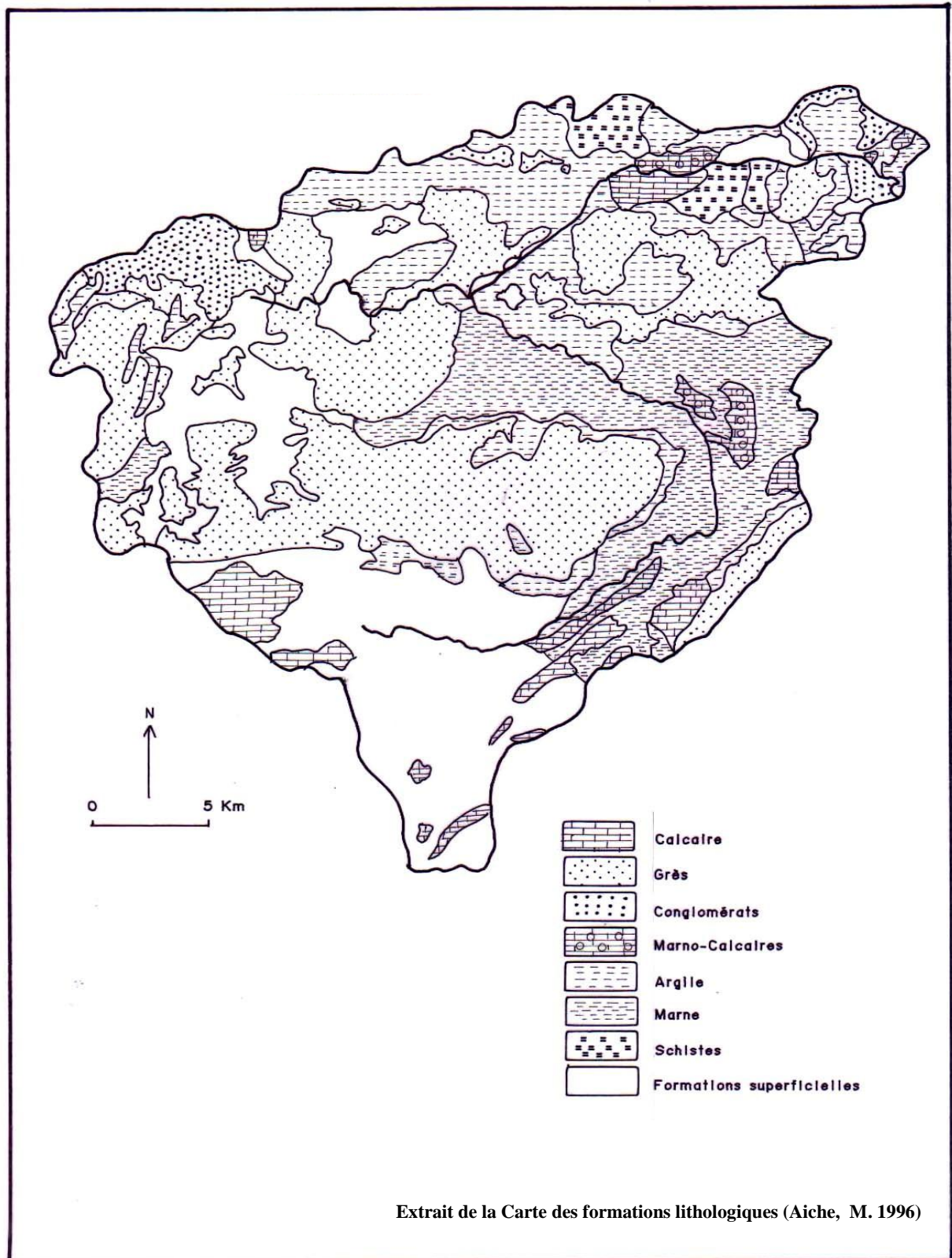


Figure II- 2 : Lithologie du bassin versant de Oued Bouhamdene

II.2.1.2. Les roches moyennement résistantes

Elles correspondent aux roches marno-calcaires de la nappe ultra tellienne. Très peu étendues, elles occupent une superficie réduite de 4,86% qui correspond à des collines à pentes moyennes à assez fortes.

II.2.1.3. Les roches tendres

Elles correspondent aux argiles sous numidiennes, aux marnes et aux marnes schisteuses de la nappe ultra tellienne. Elles se localisent essentiellement sur les versants aux pieds des grès numidiens et dans les vallées des oueds Zenati et Bouhamdene. Ces roches Présentent des pentes moyennes à plus ou moins faibles (Tableau II-1).

Tableau II-1 : Répartition des différents types de roches dans le bassin versant

Ensemble	Roches	%
R. résistantes	Calcaires	4.01
	Conglomérats	4.06
	Grès	26.90
R. moy. résistante	Marno-calcaires	4.86
R. tendres	Argiles	12.17
	Marnes	8.98
	Marnes schisteuses	2.08
Les formations superficielles		36.04

II.2.2. Le cadre structural

Les descriptions qu'on abordera ci-après, sont inspirées en grande partie de la notice explicative de la carte géologique au 1/200.000 de Constantine (Figure II-3 a et b).

Le schéma structural du bassin versant de l'oued Bouhamdene montre les unités structurales suivantes :

II.2.2.1. Les formations peu ou pas tectonisées

II.2.2.1.1. Le Quaternaire

Le Quaternaire est responsable de beaucoup de dépôt et de formations superficielles, tels que les alluvions qui constituent les fonds des vallées et les différents niveaux de terrasses. Il constitue également les glacis polygéniques, méridionaux et les

glacis anciens de Constantine auxquels il faut ajouter les croûtes calcaires du Villafranchien qui ne prennent de l'extension que dans la partie sud du bassin versant, au nord-est de Ain-Abid et les éboulis à gangue, à blocs et en masse qui se développent exclusivement en bordure du massif numidien et des glacis anciens.

II.2.2.1.2. Le Mio-Pliocène continental

Ce sont des formations continentales discordantes sur toutes les séries antérieures, constituées de conglomérats et d'argile sableuses rouges. Ces formations sont présentes dans toute la région, mais ne prennent une grande extension que dans la partie Nord-Ouest du bassin versant et plus particulièrement dans les forêts des Béni-M'djalel et Sadrata et près du barrage Bouhamdene sur la rive gauche de l'oued, ainsi qu'à Kef Hadjar et Bled Bounezoura près de Ain Abid.

II.2.2.2. Nappe numidienne

Le terme « numidien » est réservé pour désigner de bas en haut, la trilogie : argiles sous-numidiennes, grès numidiens et argiles supra-numidiennes, qui sont des ensembles à dominance gréseuse.

Les formations argilo-gréseuses du Numidien constituent les hauteurs du Djebel Ouach, d'oued Zenati, du Djebel Mahouna, du Djebel Meida près de Sadrata, près d'Ain Abid et à Sigus (au Sud du Djebel Oum Settas).

II.2.2.3. La nappe tellienne

C'est la formation la plus importante et la plus épaisse, elle affleure largement au Sud d'oued Zenati, en aval de Ain Regada. Elle y dessine un pli anticlinal d'axe SW-NE parallèle au lit de l'oued. A la base de cette unité affleurent des marnes noires d'âge Paléocène moyen à supérieur, surmonté par une barre de calcaire noire de l'éocène inférieur. Enfin une importante couverture marneuse qui couvre de vastes espaces à l'Est et au Sud de l'oued Zenati, ainsi qu'au Nord de la route Constantine-Guelma. Cette couverture présente de nombreux bancs calcaires décimétriques.

II.2.2.4. La nappe néritique constantinoise

La nappe néritique constantinoise correspond à l'essentiel des reliefs calcaires. Sur près de 10 Km d'Ouest en Est et 80 Km du Nord au Sud, la tectonique a dispersé les affleurements des séries néritiques constantinoises, en massifs isolés de tailles

variables. (Vila, 1980). Dans notre terrain, cette nappe est représentée par Djebel Oum Settas et Djebel Taya.

a- Djebel Oum Settas

Situé au Nord- Ouest du bassin versant, entre El Aria et Ain Abid, il est le plus vaste de la série néritique constantinoise. Chevauché par la série ultra-tellienne, il présente les affleurements suivants :

- Le Barrémien : calcaires dolomitique ;
- L'Aptien- Albien : calcaires massifs graveleux ;
- Le Vraconien : calcaires marneux encroûtés ;
- Le Cénomaniens : calcaires massifs et rubanés ;
- Le Sénonien : calcaires à micro- brèche.

b- Djebel Taya

Le Djebel Taya constitue le point culminant de tout le Tell Nord- guelmien. Il est constitué d'une succession de trois escarpements parallèles de direction E-W, orientés tous vers le Nord. Djebel Taya correspond donc à deux sommets de composition très inégale. Dans chaque kef, la série stratigraphique se répète et elle est identique à celle de Djebel Oum Settas.

II.2.2.5. Les unités ultra- telliennes

La nappe ultra-tellienne affleure à la base des massifs numidiens du bord septentrional de la région. Les séries constitutives de ces unités sont caractérisées par leur teinte claire allant du Néocomien à l'Eocène moyen.

L'ultra tellienne occupe une position au Nord du domaine tellien et se place sous les flysch massyliens ou numidiens Nord et sur les unités telliennes au Sud.

La stratigraphie actuelle des unités ultra-telliennes montre l'existence de 4 unités renversées (Lahondere, 1987). De bas en haut, on a :

a. L'unité de Aïn Haddad

Elle se caractérise par des formations d'âge allant du Néocomien à l'Albien moyen et par une teinte claire. Elle est comprise entre l'unité de Aïn Guennour au-dessous et la nappe numidienne au-dessus. La partie inférieure est marneuse. Dans la partie médiane en

voit alterner des marnes et des calcaires. La partie supérieure renferme sur 30 m, de nombreux bancs de calcaire micritiques qui alternent avec des marnes brunes.

b. L'unité de Aïn Guenoure

Les affleurements de cette unité se présentent en lames comme suit:

• La lame supérieure

Renferme les terrains les plus anciens. Elle débute par des marno-calcaires d'âge Albien et atteint le Vraconien. Au-dessus, on a des marnes verdâtres du Cénomaniens, elles même surmontées par des marnes calcaires de teinte vive, comprenant un Turonien peu épais et du Coniacien.

• La lame intermédiaire

Elle affleure à Bordj Merkhouma remontant l'oued Bouskoum vers le Sud. Les formations marno-calcaires dominante dominantes du Coniacien et du Turonien.

• La lame inférieure

Affleure à Chaâbet Boudernen, elle comprend des marnes du Santonien et exceptionnellement, des bancs calcaires du Coniacien.

c. L'unité de oued Zenati

Cette unité regroupe les formations d'âge Sénonien supérieur, avec deux barres calcaires, la première d'âge Campanien, la seconde Maestrichtien. Ces formations se sont développées surtout au Nord-Ouest de oued Zenati sur une bande large de 5 Km, qui atteint Ras El Akba. On retrouve cette unité au Nord sous forme de fenêtre dans la région de Bordj Sabath.

d. L'unité de Ras El Akba

Structuralement, elles sont comprises entre les formations telliennes au-dessous, et l'unité d'oued Zenati au-dessus. Elle affleure autour de la localité portant le même nom, ainsi qu'à l'Ouest autour de Beled El Aggoun et au Sud de Aïn Rhorab et Djellili. Ce sont des formations marno-calcareuses, allant du Paléocène moyen à l'Eocène inférieur.

II.2.2.6. La série de Aïn El Kerma

Les formations essentielles de cette série sont les marnes et les marno-calcaires de teinte claire. Cette série affleure à l'ouest du village de Ras El Aïoun, où elle est

constituée surtout d'argile verte, et à l'Ouest du pont qui enjambe l'oued Bouskoum. Cependant, les deux affleurements les plus importants de cette unité se trouvent dans la vallée de l'oued Bouhamdene. Le premier est situé au lieu-dit El Madjen et le second constituant la ligne de crête entre les djebels Taya et Mermera

Les différentes formations de cette série sont :

- Des marnes noires à lits de calcaire gris du Santonien et du Campanien ;
- Des argiles grises très froissées, à galets et blocs du Paléocène moyen à supérieur ;
- Des argiles vertes, esquilleuses, renfermant des lits de schiste du Paléocène moyen à supérieur ;
- Des marnes et argiles noires indurées de l'Eocène moyen.

II.2.3. Les mouvements tectoniques

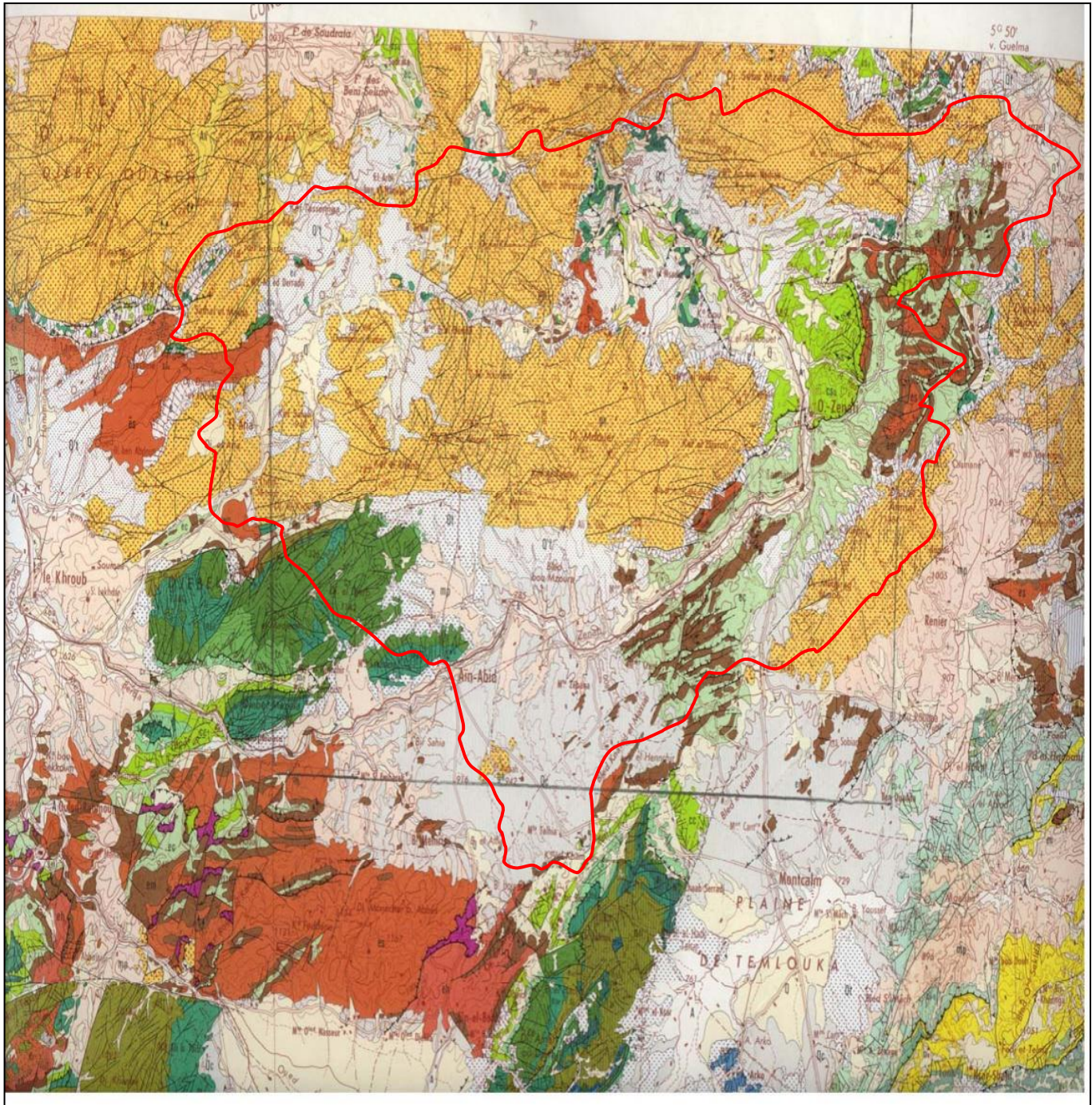
On distingue une série de phases tectoniques durant le Tertiaire, depuis l'Eocène moyen jusqu'au Burdigalien supérieur (Chouabbi, 1987).


II.2.3.1. La phase éocène

Elle est caractérisée par une tectonique compressive qui est à l'origine de la naissance d'une pente du côté Sud en direction du domaine centralo-tellien. L'existence de cette pente entre un domaine ultra-tellien plus élevé et un centralo-tellien plus bas, permet la mise en place des différents diverticules qu'a révélés l'étude de l'ultra-tellienne de oued Zenati (Lahondere, 1987).

Le mécanisme de diverticulation s'explique par la présence de cette pente qui aurait facilité le glissement des diverticules selon les étapes suivantes :

1. approfondissement du sillon tellien.
2. mise en place du premier diverticule.
3. nouvel approfondissement du sillon tellien.
4. mise en place des diverticules suivants.



 Limite du bassin versant

Extrait de la Carte géologique Constantine 1/200.000

Figure II-3 a : Géologie du bassin versant de l'oued Bouhamdene.

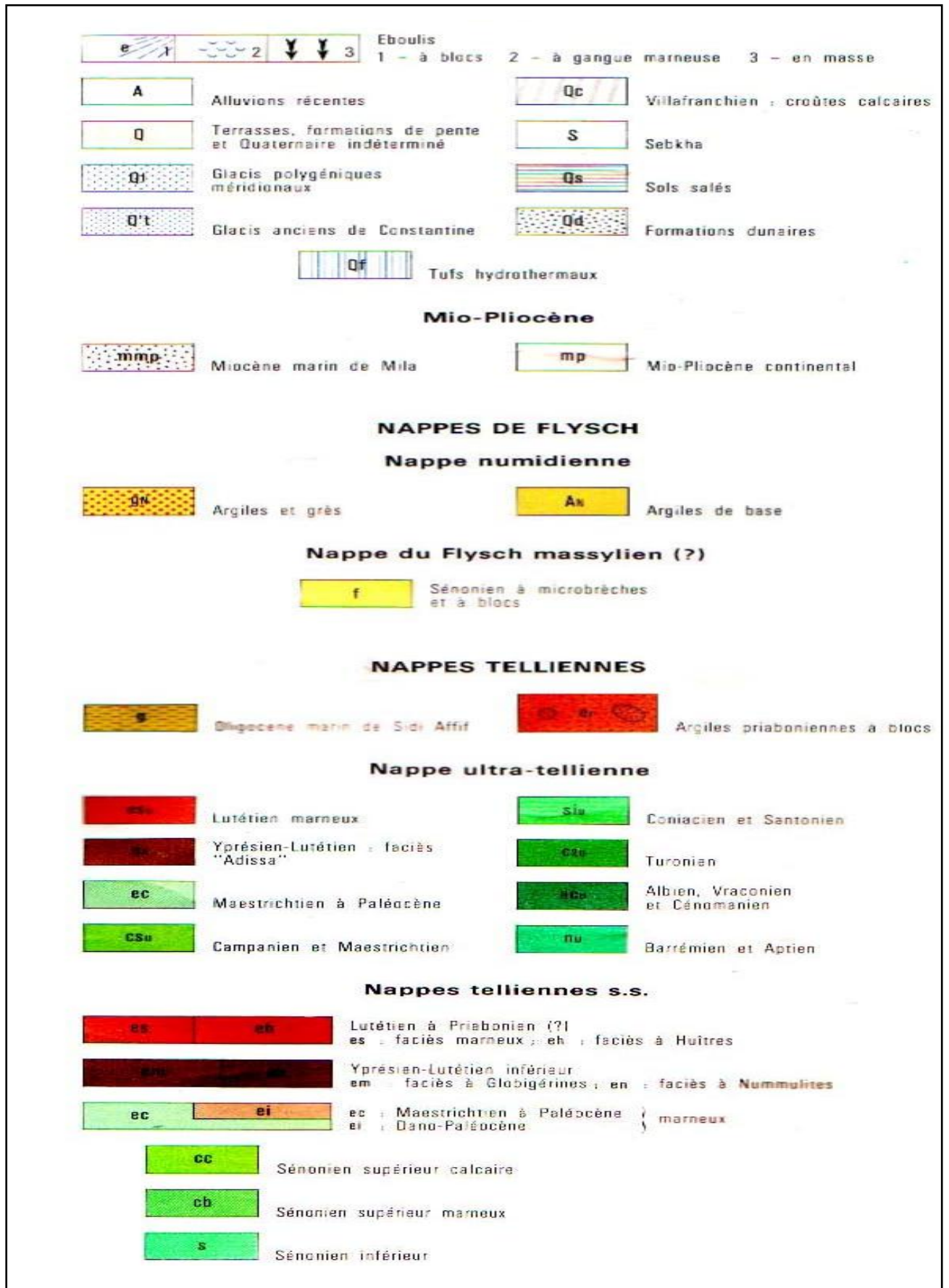


Figure II-3 b : formation peu ou pas tectonisées quaternaire

II.2.3.2. La période comprise entre la phase éocène et la phase de l'éocène inférieur

A partir de l'oligocène, cette zone a connu une sédimentation généralement argileuse, surmontée par des barres de grès. Cette série est connue sous le nom de « la série Numidienne ». La conséquence de cette phase dans le Sellaoua, est l'apparition du décollement à plusieurs niveaux de la série du Sénonien supérieur. La lithologie favorise ce phénomène avec la présence de deux barres calcaires épaisses de 100 m, séparées par des marnes qui ont servi de semelle plastique (Chouabbi, 1987).

II.2.3.3. La phase miocène

La phase du Miocène inférieur est responsable du décollement et du charriage vers le Sud des nappes telliennes et de la série numidienne.

Les formations numidiennes se sont désolidarisées de leur substratum au cours du Burdigalien. Etant situées au Sud des zones kabyles, elles ne parviennent en recouvrement anormal qu'après la ressédimentation des flyschs et des témoins de la série ultra-tellienne. Ces premiers mouvements sont fossilisés par la transgression du Burdigalien. Les formations numidiennes ainsi décollées sont reprises par la tectonique tangentielle du Turonien. » (Vila, 1980).

II.2.3.4. La néotectonique

Elle est responsable de l'orographie actuelle. Elle a déterminé le comblement des bassins mio-pliocènes alimentés par la destruction des reliefs environnants. C'est à cette époque que l'on doit situer les plis à grand rayon de courbure et les vastes failles qui mettent en relief la nappe néritique constantinoise. Ces failles sont essentiellement distensives.

II.2.3.5. Les formations pas ou peu tectonisées

L'exemple le plus typique de ces formations, sont les glacis et les dépôts du Mio-Pliocène continental qui représentent de vastes épandages d'origine détritique, résultant d'une tectonique tangentielle ou cassante, car ils se sont déposés après les grands événements tectoniques connus dans la région.

II.2.4. La perméabilité

L'importance de la perméabilité dans l'écoulement et son influence sur l'érosion, nous imposent à déterminer les classes de perméabilité suivantes (Tableau II-2) (Figure II-4) :

Tableau II-2 : La distribution des classes de perméabilité du bassin versant

Perméabilité des roches	Formations lithologiques	Superficie km²	%
Formations à Perméabilité élevée	Calcaires	44.34	4.01
Perméable	Formations superficielles	357.81	32.39
Formations moyennement perméables	Grès Conglomérats Marno-calcaires Marnes schisteuses	447.6	40.51
Formations à perméabilité faible	Argiles Marnes	255.7	23.14

D'après le Tableau II-2 on remarque que les formations à perméabilité élevée représentent 4% de la superficie du bassin versant, et on trouve que les formations perméables et moyennement perméables qui sont affleurent dans le bassin de l'oued Bouhamdene.

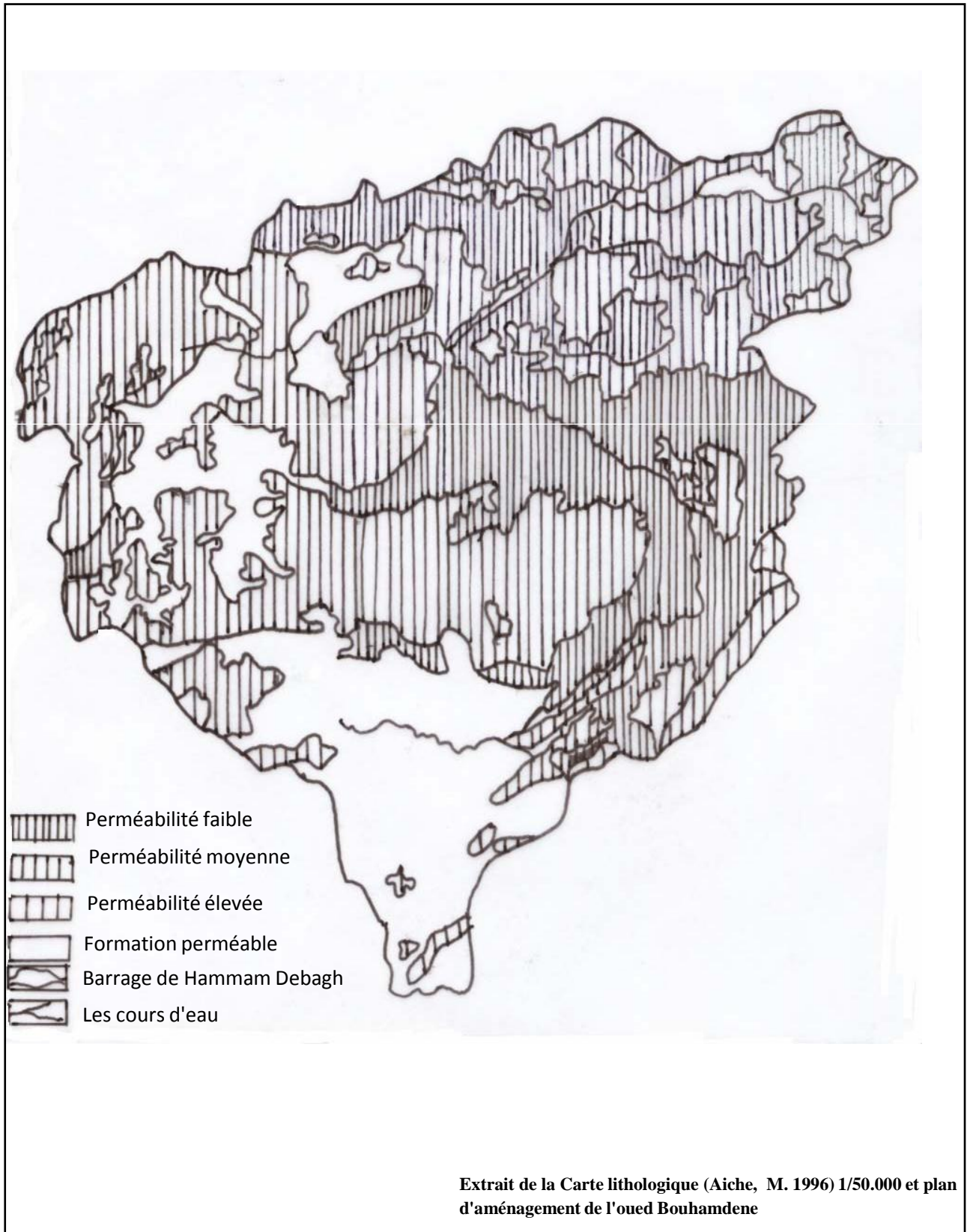


Figure II-4 : Perméabilité du bassin versant de l'oued Bouhamdene

Conclusion

L'examen de la géologie du bassin versant de l'oued Bouhamdene permet de voir qu'on a trois formations géologiques. Dans la partie supérieure du bassin versant, on rencontre des formations tendres et pentées, constitué principalement de marnes, grès, marno-calcaires, et des formations superficielles. La région ouest, présente des formations raides, constituées principalement de grès et de conglomérats. Elles sont généralement perméables, ce qui favorise l'écoulement de surface. Le bassin inférieur constitué en majeure partie de roche résistantes à moyennement résistantes: grès, des argiles, marne des schistes et de terrains encroûtés, de faible perméabilité ce qui favorise également le ruissellement.

Chapitre III

GEOMORPHOLOGIE

Introduction

L'étude des caractéristiques morphométriques, en plus de l'analyse hydrologique d'un bassin versant constitue une plate-forme essentielle pour l'explication et la compréhension de son comportement hydrologique. La forme, la superficie, le relief et les pentes influent sur le mouvement et le ruissellement superficiel dans un bassin versant.

III.1. Délimitation du bassin versant

Le bassin versant d'un cours d'eau englobe l'ensemble des bassins versants élémentaires qui alimentent chaque point de la rivière. Ainsi, le grand bassin versant d'un fleuve recouvre l'ensemble des bassins versants de ses affluents, du chevelu à la rivière secondaire.

Dans sa partie orientale, et du Nord vers le Sud, la limite du bassin versant suit la ligne de partage des eaux séparant les chaâbets Sehouek et Louba et se poursuit en joignant les sommets de Koudiat Bourhoussine .Aux alentours de la localité de Ras El Akba, elle passe par les sommets de Djebel Essaâda (1108 m) et Djebel Ancel (1124 m) Djebel M'dereg Narou au SW de Ain Trab. Cette limite se poursuit en reliant les sommets d'une série de monticules culminant à des altitudes moyennes d'ordre (950 m), avant d'atteindre les sommets à l'extrême Sud-Est (1065 m).

Au Sud, le bassin versant est délimité par Koudiat Dib (1124 m). Dans sa partie Ouest, la limite est constituée par la ligne de partage des eaux qui passe par les sommets de Djebel El Guettar (1246 m), Djebel Oum Settas (1324 m) et Kef Si Salah près d'El Aria. Au Sud de ce village, la limite passe par les sommets où les altitudes sont de l'ordre (900 m).

La limite remonte vers le Nord, pour relier les sommets de Djebel Lobba à M'zaret Sidi Chagref (1289m) et Koudiat N'Zel El Kraznadja à l'extrême Nord-Ouest.

Dans la partie septentrionale, la limite du bassin versant , de l'Ouest vers l'Est , elle passe à travers la forêt de chêne liège de Soudrata et suit la ligne de crêtes séparant la vallée de l'oued Bouhamdene de celle de Zerdazas, et se continue vers l'Est en reliant les sommets des Djebels Taya et Mermera et en fin, celles du Djebel Arara à Medjez Amar. (Figure III-1).

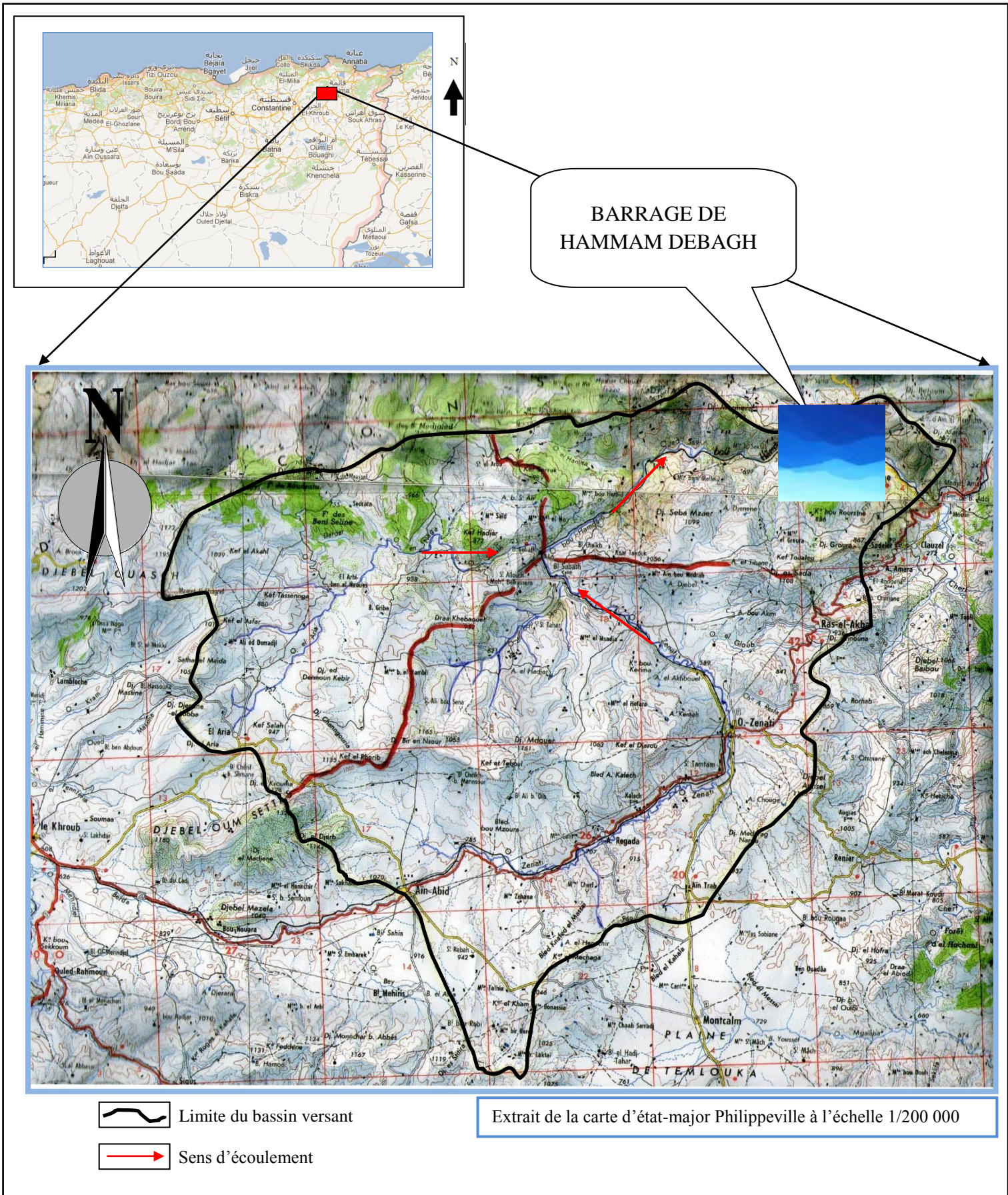


Figure III-1 : Délimitation du bassin versant du Barrage de Hammam Debagh

III.2. Le milieu physique

III.2.1. La montagne

Elle correspond aux points culminants qui délimitent le bassin versant à sa limite Ouest, Est, Nord et Sud, ainsi, que celles qui sont orientées Ouest-Est qui bordent dans la partie médiane l'oued Zenati sur sa rive gauche depuis Ain Abid jusqu'aux environs de la localité de l'oued Zenati. Elle s'élève à une altitude comprise entre 997 m à Djebel El Aria et 1237 m à Djebel Oum Settas. Elles présentent des sommets plus ou moins arrondis à cause de la structure géologique à plate-forme structurale bien connue : les grès numidiens. Seuls les Djebels Taya et Oum Settas sont formés de calcaires qui impriment l'aspect massif à ces deux reliefs.

III.2.2. Les collines

Les points culminants sont compris entre 800 et 1000 mètres, elles se prolongent parallèlement aux montagnes. Elles sont issues de destruction des formations gréseuses et marno-calcaires. Elles se caractérisent par des sommets arrondis et parfois plan et des côtés raides.

III.2.3. Les piedmonts

Aux différents types de reliefs disséqués, s'ajoute le modelé des piedmonts. Caractérisés par des pentes assez fortes à fortes, et des profils souvent concavo-convexes, ils sont du point de vue superficie, les plus tendus. En effet, ils s'étalent sur 939 km², soit 85% du bassin versant.

III.2.4. Les vallées alluviales

Elles correspondent aux terrasses alluviales qu'on rencontre dans les principales vallées des oueds Zenati et Bouhamdene à l'Est de Taya. Dans les vallées secondaires, elles se réduisent à des fragments dont les plus anciens sont systématiquement détruits par l'érosion, alors qu'elles sont inexistantes dans les sections où les oueds coulent entre des versants très pentus qui prennent parfois l'aspect d'une gorge.

III.2.5. Le couvert végétal

L'analyse de la couverture végétale a été établie sur la base des données statistiques agricoles relatives aux communes ou parties de communes incluses dans le bassin, obtenues auprès de la direction des services agricoles.

D'après ces statistiques, la caractéristique essentielle est la prédominance des surfaces occupées par les céréales et les cultures maraîchères, qui représentent la part majoritaire dans le bassin, dont la proportion est d'environ 60% de la surface totale du bassin. Les terrains favorisant le ruissellement notamment les terrains de parcours et les terrains nus restent moins importants (3%), tandis que les terrains boisés, occupent 20% de la surface du bassin (Figure III-2).

III.2.6. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et converge vers un seul point de vidange du bassin versant (exutoire).

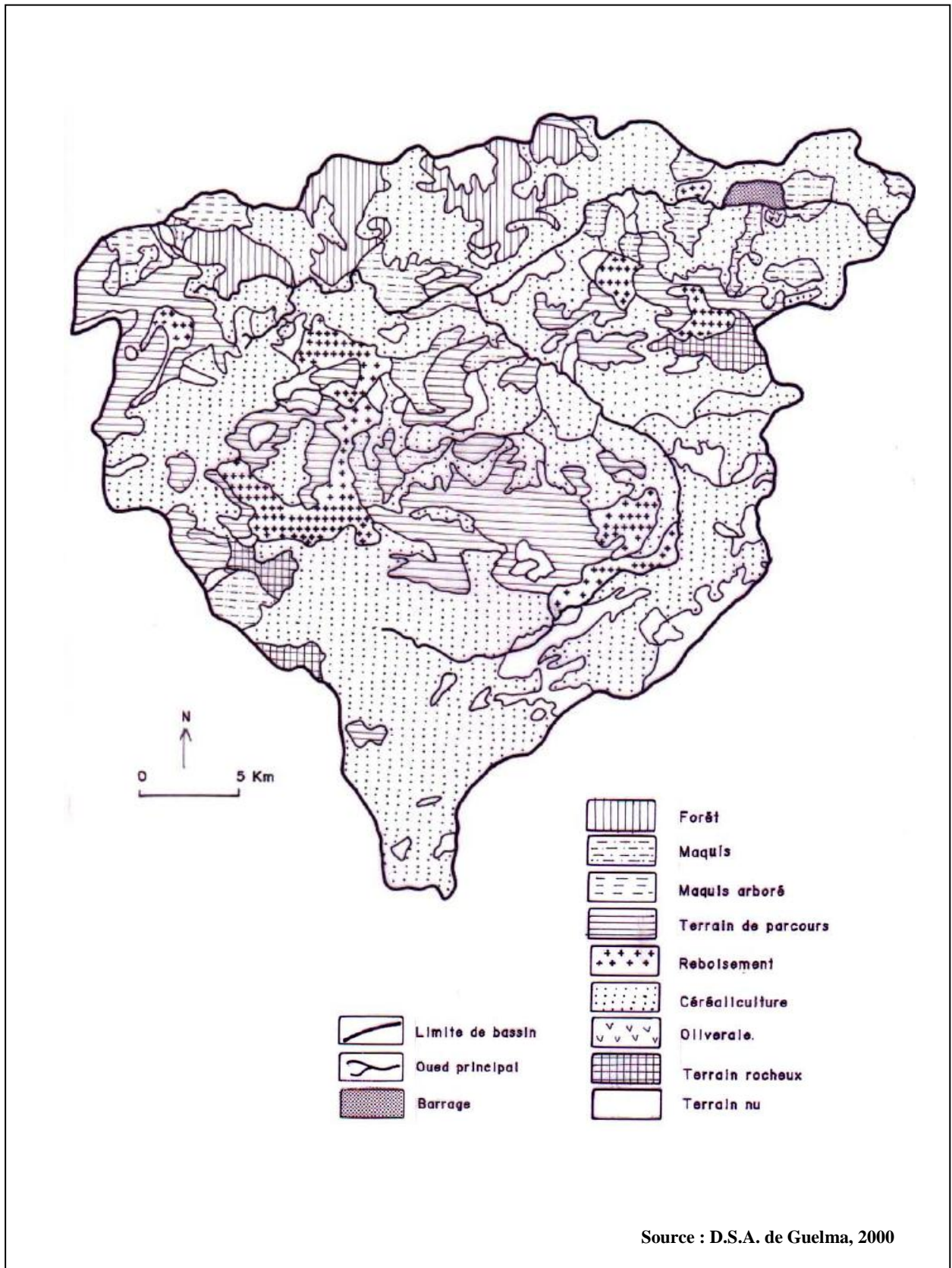
III.2.6.1. Présentation

L'oued Bouhamdene résulte de la jonction de deux cours d'eau importants : l'oued Sabath et l'oued Zenati, drainant respectivement une superficie de 296 Km² et de 592 Km² et dont la confluence donne naissance à l'oued Bouhamdene qui reçoit dans sa rive gauche oued El Hamira.

L'oued Zenati naît de la confluence de l'oued El M'leh qui prend sa source à Djebel Oum Setttas (1326 m), et chaâbet Touifsa qui prend sa source à Kef Ed Deb (1142 m). L'oued Zenati reçoit sur sa rive gauche les oueds : Bou Skoum, Berneb, Kalech, chaâbet Er Rassoul, Snoussi et sur sa rive droite, Chaâbet Guelt et Terba, oued El Gloub, Chaâbet Mrassel.

L'oued Sabath résulte aussi de la jonction de deux oueds : El Aria qui prend sa source à Djebel El Aria (1237 m), oued El Aria reçoit dans sa rive droite : oued Tarfa et dans sa rive gauche : oued Haoudja et Chaâbet et Temar.

Oued Dardar qui prend naissance à partir de la confluence de l'oued El Megroune, prend sa source à M'zaret Sidi Chagref (1289 m) et Chaâbet es Sekek qui prend sa source à El Hadjar Essafra (1174 m) (Figure III-3).



Source : D.S.A. de Guelma, 2000

Figure III-2 : Couverture végétale du bassin versant de l'oued Bouhamdene.

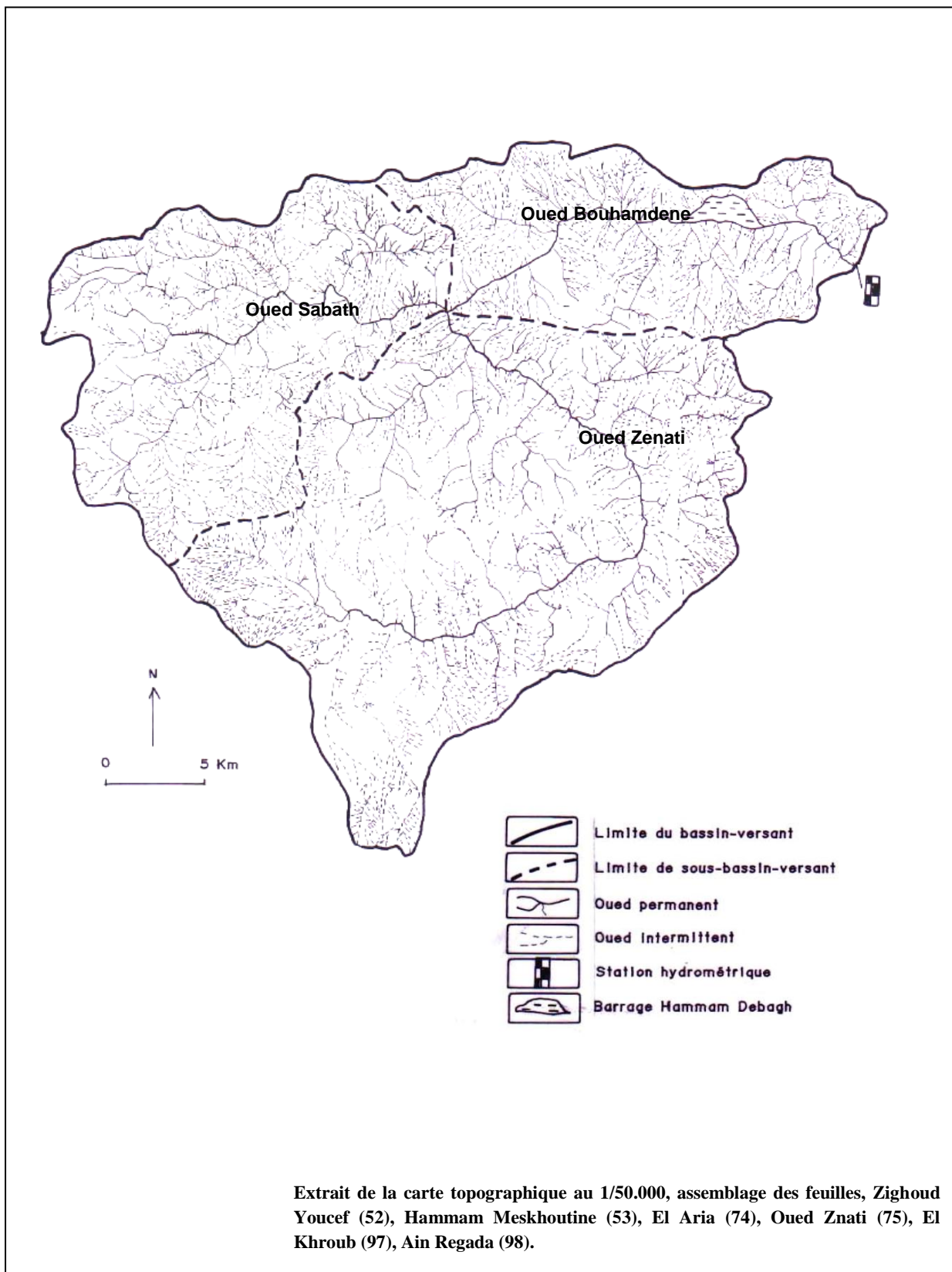


Figure III-3 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Bouhamdene.

III.2.7. Caractéristiques morphométriques du réseau hydrographique du bassin de Oued Bouhamdene

III.2.7.1. Profil en long

Le profil longitudinal de l'oued Bouhamdene et ses principaux affluents (Figure III-4), permet d'apporter des éléments complémentaires à la densité de drainage, au vu de rôle des pentes des talwegs sur le ruissellement superficiel, et sur la vitesse d'écoulement lors des crues. Ils ont été tracés pour un pas de distance de 5 Km dans le sens de l'écoulement.

Le profil en long de l'oued Zenati présente une seule rupture située au contact de deux zones respectivement les glacis et la vallée alluvial tout comme l'oued Sabath. L'oued Bouhamdene présente une rupture à l'altitude de 500 m, et quelques ruptures de pente légères, qui correspondent à des seuils rocheux particulièrement résistants.

Les profils longitudinaux de ces trois cours d'eaux se caractérisent par des pentes assez faibles.

III.2.7.2. Paramètres morphométriques :

L'utilisation des caractéristiques morphométriques du bassin versant a pour but de caractériser le comportement hydrologique du bassin de Oued Bouhamdene. Tous les paramètres morphométriques du bassin versant sont récapitulés dans le tableau II-1. La surface, le périmètre et la longueur du talweg principal sont calculés à partir des cartes topographiques : Constantine, Philippeville et Hammam Meskhoutine au 1/200 000).

Selon les paramètres morphométriques du bassin de Oued Bouhamdene, on constate qu'il draine une superficie de 1105 Km² de forme allongée. Caractérisée par un réseau hydrographique dense ($D_d=2.45 \text{ Km/Km}^2$).

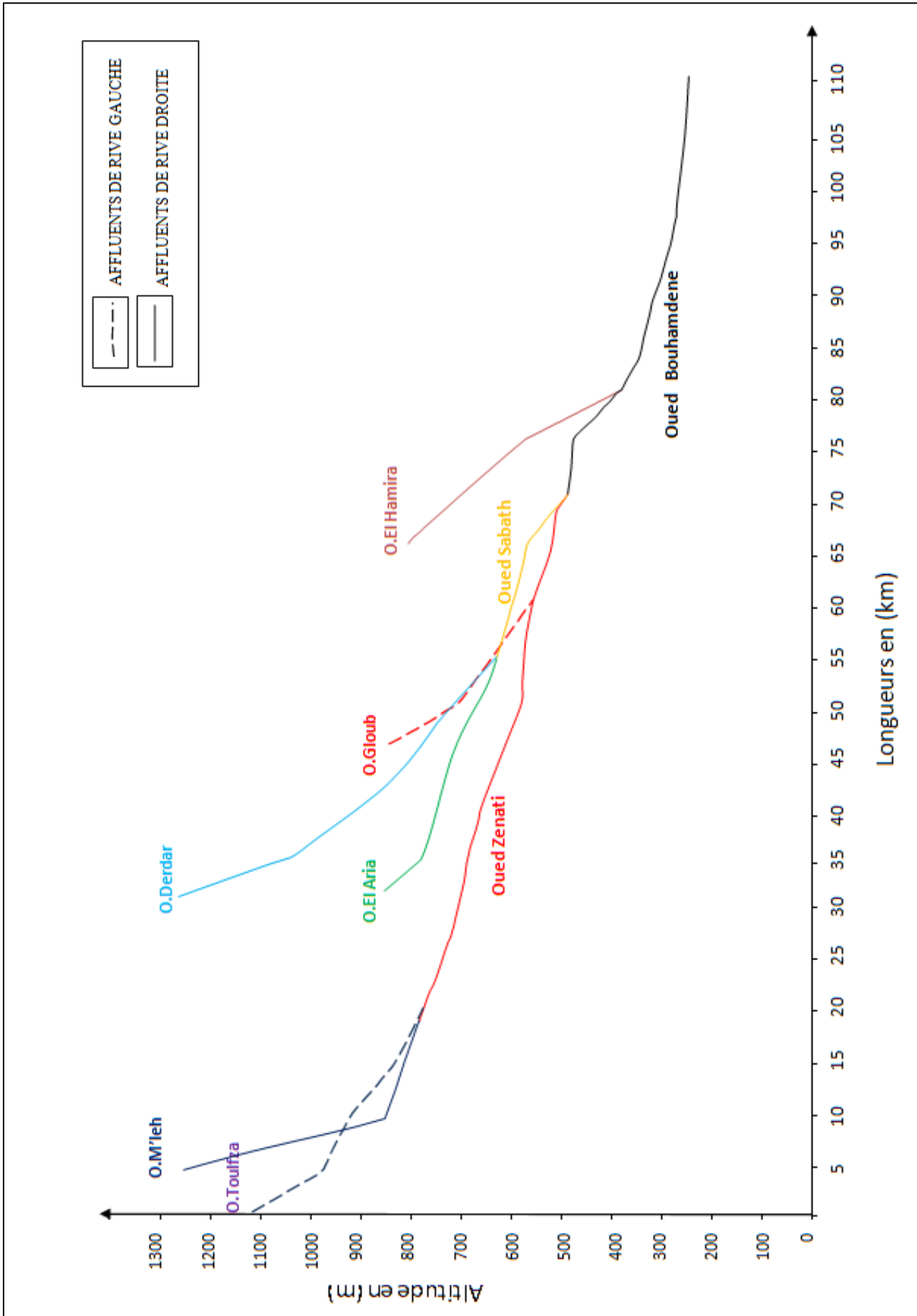


Figure III-4 : Profil en long de l'oued Bouhamdene et de ses principaux affluents

Tableau III-1 : Paramètres morphométriques de Oued Bouhamdene.

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Superficie	S	1105	km ²
Périmètre	P	140	km
Indice de compacité	Kc	1.17	/
Altitude maximale	H _{max}	1289	m
Altitude minimale	H _{min}	285	m
Altitude moyenne	H _{moy}	787.5	m
Dénivelée spécifique	D _s	374.63	m
Temps de concentration	T _c	15	h
Densité de drainage	D _d	2.45	km/km ²
Pente moyenne	P _m	30.20	m/km
Longueur du Talweg principal	L _p	90	km
Longueur du rectangle équivalent	L _e	44.76	km
Largeur du rectangle équivalent	l _e	24.68	km

Conclusion

La géomorphologie a montré que le bassin de l'oued Bouhamdene occupe une superficie de 1105 km² et talweg principal a une longueur de 90 km.

Le réseau hydrographique de ce bassin versant est très dense dans les zones à formation lithologique marneuse ou argilo-silteuse, associées souvent à des fortes pentes dans la partie Nord-Est de la vallée de Bouhamdene et Djebels Taya et Mermera. Le reste du bassin est caractérisé par un réseau hydrographique moins dense, en raison des formations perméables à moyennement perméable traversée et organisée en pentes fortes à douces.

On peut dire que le bassin versant de l'oued Bouhamdene présente une opposition topographique très nette entre le Nord et le Sud. La partie Nord est caractérisée par une topographie chaotique et désordonnée. Par contre la partie Sud a une topographie plus libre, des formes plus nettes et les versants sont longs et moins raides.

Chapitre IV

HYDROCLIMATOLOGIE

Introduction

Le cycle hydrologique subit de nombreux processus, complexes et variés, mesurables pour certains, estimés par approximations pour d'autres : précipitations, ruissellement, évapotranspiration, percolation-infiltration et emmagasinement.

Les conditions climatiques, plus que d'autres facteurs régissant l'écoulement fluvial (morphologie, lithologie,...etc.) jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eaux. Les précipitations, surtout liquides sont de loin les plus importantes. Elles constituent le facteur essentiel agissant sur l'écoulement de surface.

Pour compléter l'étude de suivi de la qualité des eaux de surface de Oued Bouhamdena, une analyse des facteurs climatiques s'avère nécessaire. Cette analyse permet de dégager, non seulement les grands traits du climat qui règne dans la zone d'étude, mais aussi les facteurs qui le régissent, en particulier les précipitations journalières, les températures, l'évaporation, qui ont une influence directe ou indirecte sur le régime d'écoulement et par la suite sur la qualité des eaux ruisselées et stockés au niveau des barrages (Bouguerne, 2001).

IV.1. Les données climatiques disponibles

Les données climatiques utilisées pour l'analyse sont la température, précipitation, apport, évaporation, mesurées au niveau du barrage de Hammam Debagh par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) sur une période de 11 ans (1995/2005). Tableau IV-1. Cette période est suffisante pour définir les caractéristiques essentielles du climat. Plusieurs contraintes ont limité la portée initiale de ce travail : le manque de données climatiques journalières à l'intérieure du bassin et l'absence des mesures hydrométriques fiables sur Oued Bouhamdene. Cet handicap n'influe pas sur l'étude de la variation rendu de la qualité des eaux du barrage.

Tableau IV-1 : Caractéristiques des données mensuelles climatiques, des apports liquides et du volume de la cuvette du barrage de Hammam Debagh.

Paramètres	Min.	Moy.	Max.	Médiane	Ecart type	Coefficient de variation
Précipitations	0.00	48.81	244.10	32.95	51.30	1.05
Températures	4.06	18.72	31.53	17.93	7.57	0.40
Evaporation	0.07	0.45	1.23	0.35	0.31	0.68
Apport liquide	0.00	8.93	130.29	0.73	22.94	2.57
Volume de la cuvette	32.78	131.12	187.36	134.63	38.87	0.30

IV.2. Caractérisation hydroclimatologique du bassin versant de l'Oued Bouhamdene

IV.2.1. Climatologie

IV.2.1.1. Le Climat

Toute étude hydroclimatologique nécessite des renseignements bien précis des différents facteurs qui régissent les variations climatiques.

Les mécanismes essentiels du climat algérien sont régis par deux facteurs :

- Les facteurs géographiques : liés à l'altitude et donc l'effet de continentalité.
- Les facteurs météorologiques : liés au front saharien et au front méditerranéen.

Pour déterminer le type de climat, nous avons utilisé deux méthodes, qui chacune va renseigner sur les caractéristiques du climat régional, il s'agit de l'indice de De Martonne (1925), et du diagramme Ombrothermique de Gaussen.

• Indice de De Martonne

De Martonne (1925) a proposé une formule climatologique, appelée indice d'aridité, fonction de la température (T) et des précipitations (P) de la forme :

$$A = \frac{P}{(T + 10)} \quad \text{(Equation IV-1)}$$

Avec :

A : indice d'aridité annuelle.

P : précipitations moyennes annuelles en mm. P = 585,56 mm.

T : températures moyennes annuelles en °C. T = 18,72 °C.

Selon De Martonne :

- Si $A < 5$: Le climat est Hyper aride.
- Si $5 < A < 10$: Le climat est très sec.
- Si $10 < A < 20$: Le climat est sec.
- Si $20 < A < 30$: Le climat est tempéré.
- Si $A > 30$: Le climat est Humide où l'écoulement est abondant.

L'application de cette formule à la station de Hammam Debagh montre que le climat est de type de Tempéré ($20 < \mathbf{20.39} < 30$). Ce climat est caractérisé par deux saisons, l'une humide et froide, l'autre sèche et chaude.

Pour mieux comprendre le climat de la région étudiée, on a aussi utilisé le diagramme Ombrothermique de Gaussen qui est basé sur l'analyse de deux paramètres climatiques, la température et les précipitations.

• Diagramme Ombrothermique de Gaussen

La combinaison des deux principaux facteurs climatiques, la température et les précipitations, est intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer les mois véritablement secs. Cette relation permet d'établir un graphe dit Ombrothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double des précipitations ($P = 2T$). L'application de cette technique à la région d'étude, montre qu'elle est caractérisée par un climat possédant une saison sèche qui s'étend du mois Juin jusqu'au mois d'Octobre, et une saison humide qui s'étend le reste de l'année (Figure IV-1).

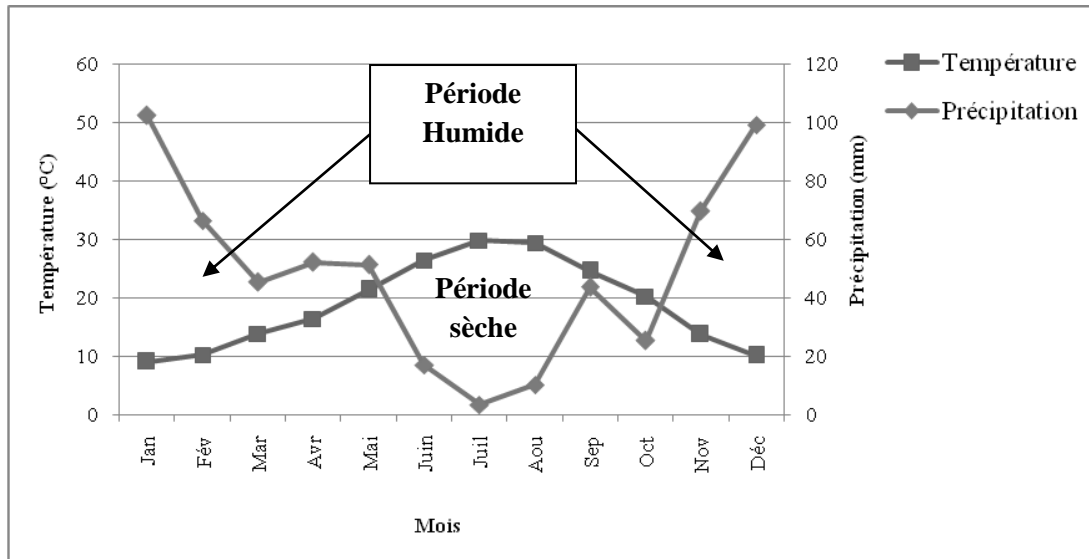


Figure IV-1: Diagramme Ombrothermique

Donc le bassin versant à oued Bouhamdene a un climat tempéré subhumide, caractérisé par deux saisons, l'une humide et froide et l'autre sèche et chaude. Pour bien préciser les différents facteurs qui le composent, nous allons étudier en détail l'évolution des paramètres climatiques notamment les précipitations et les températures.

IV.2.1.2. Evolution temporelle des données disponibles entre 1995 et 2005

IV.2.1.2.1. Evolution annuelle des précipitations, des températures et d'évaporation

Pour l'interprétation des données pluviométriques, températures et d'évaporations nous avons utilisé des séries allant de 1995 jusqu'à 2005 soit 11 ans d'observation pour la station du barrage de Hammam Debagh.

IV.2.1.2.1.1. Evolution annuelle des précipitations

La courbe de variation des précipitations annuelles (Figure IV-2) montre que l'année 2003 est l'année où on a enregistré le maximum de précipitations avec 925 mm cependant le minimum est enregistré en 2001, avec 376.2 mm. A l'échelle interannuelle, on remarque que les précipitations annuelles des années (1997,1999, 2000, 2001, 2002, 2005) sont inférieures à la moyenne interannuelle (585.56 mm). Ces années sont considérées comme sèches, par contre (1995, 1996, 1998, 2003, 2004) sont considérées comme humides.

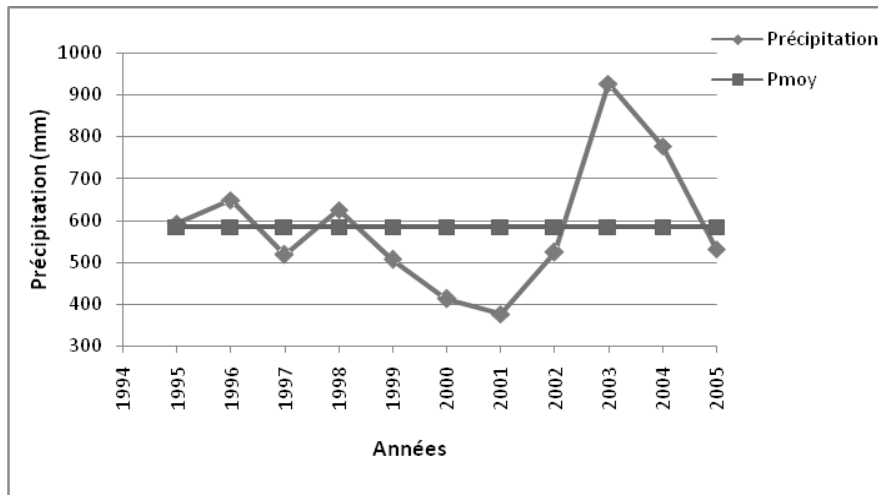


Figure IV-2 : Evolution annuelle des précipitations.

IV.2.1.2.1.2. Evolution annuelle des températures

La courbe des températures annuelles (Figure IV-3) montre la variation des températures maximales et minimales. L'année 2005 est l'année où on enregistre une température maximale de 47°C alors que la température minimale (- 9°C) a été enregistrée en 1999.

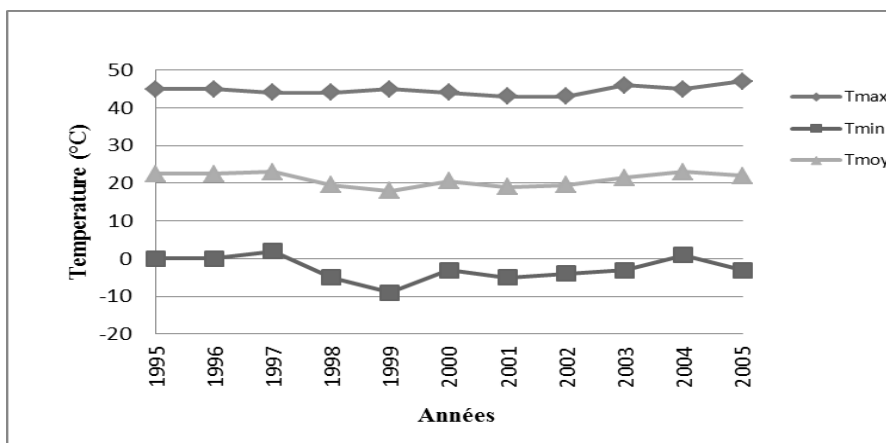


Figure IV-3 : Evolution des températures annuelles.

IV.2.1.2.1.3. Evolution annuelle de l'évaporation

La courbe d'évaporations annuelles (Figure IV-4) montre la variation de ce paramètre d'une année à une autre. L'année 2003 est l'année où on a enregistré une valeur maximale d'évaporations de 8.402 hm³ alors que la valeur minimale d'évaporations (4.485 hm³) a été enregistrée en 2000 ceci est en accord avec les valeurs de la température.

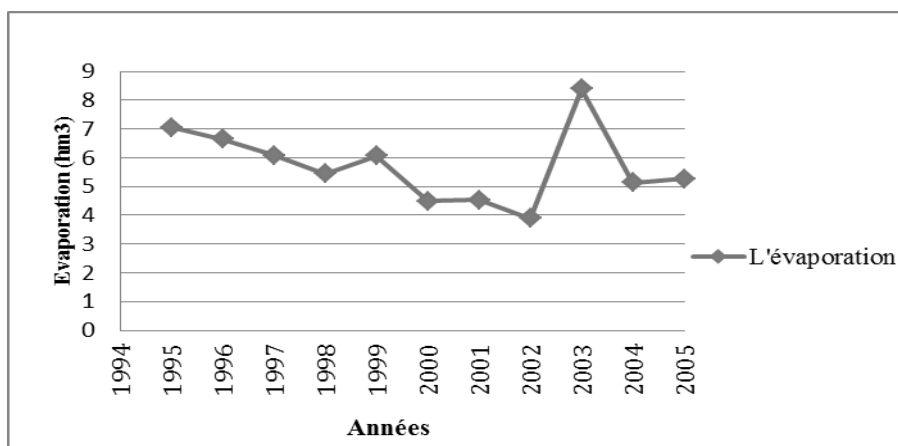


Figure IV-4 : Evolution annuelle de l'évaporation

IV.2.1.2.2. Evolution mensuelle des précipitations, des températures et d'évaporation

IV.2.1.2.2.1. Evolution mensuelle des précipitations

La forte variabilité des précipitations mensuelles montre que la valeur la plus élevée coïncide avec la saison humide au mois de janvier (105,83mm) par contre la valeur minimale coïncide avec la saison sèche au mois de juillet (4,15 mm). La valeur maximale de la moyenne mensuelle enregistrée pendant cette période correspond au mois de décembre (244.10 mm) en 2003 alors que la valeur minimale a été observée aux mois de juin, juillet et août (0 mm) (Figure IV-5).

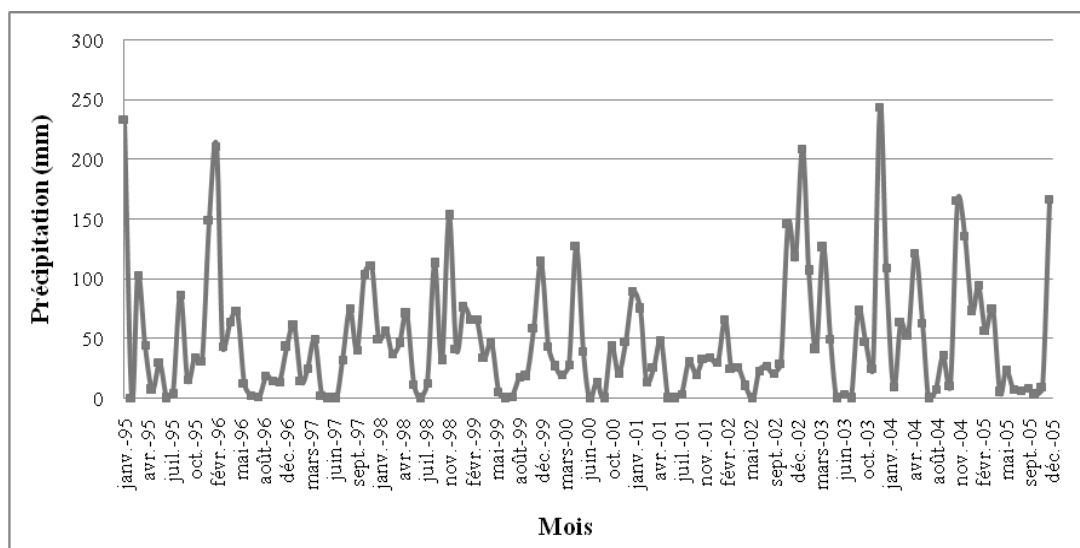


Figure IV-5: Evolution mensuelle des précipitations

II.2.1.2.2.2. Evolution mensuelle des températures

L'évolution des températures mensuelles montre que la valeur la plus élevée a été enregistrée au mois de juillet ($29,74^{\circ}\text{C}$) alors que la valeur minimale a été enregistrée en hiver au mois de janvier ($9,06^{\circ}\text{C}$). A l'échelle de tout le cycle, la valeur maximale moyenne mensuelle est observée au mois de juillet ($31,53^{\circ}\text{C}$) en 1998 et la valeur minimale moyenne mensuelle a été observée au mois de janvier ($4,06^{\circ}\text{C}$) en 2003 (Figure IV-6).

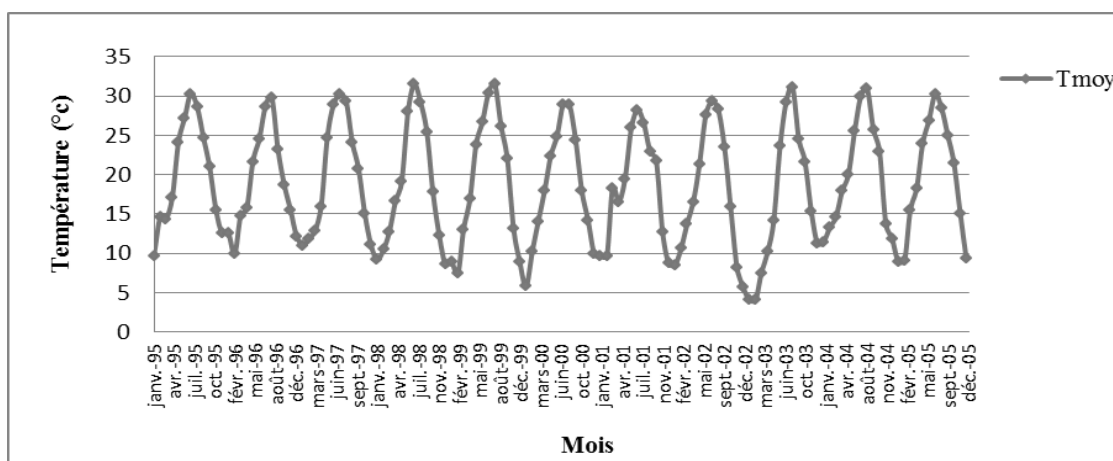


Figure IV-6 : Evolution mensuelle des températures.

IV.2.1.2.3. Evolution mensuelle de l'évaporation

L'évolution de l'évaporation mensuelle au niveau de la cuvette du barrage, a été consignée dans la figure IV-7. La valeur la plus élevée coïncide avec l'été au mois de juillet (0.99 hm^3) par contre la valeur minimale coïncide avec l'hiver au mois de décembre (0.14 hm^3).

A l'échelle de tout le cycle, la valeur maximale de la moyenne mensuelle a été observée au mois de juillet (1.232 hm^3) en 1995 et la valeur minimale a été observée aux mois de janvier (0.065 hm^3) en 2003 ceci est toujours en accord avec la température (Figure IV-7).

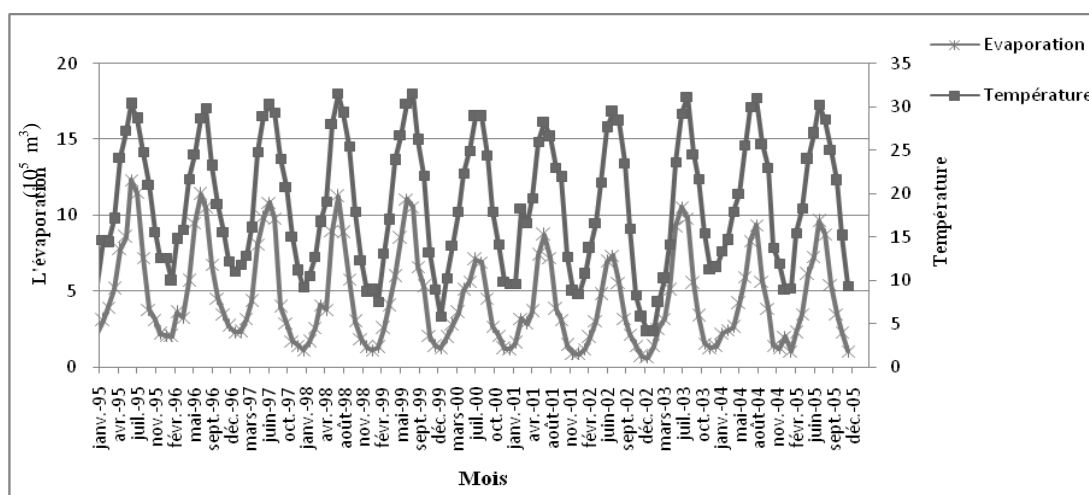


Figure IV-7 : Evolution mensuelle de la température-évaporation

IV.2.2. Hydrométrie

IV.2.2.1. Evolution dans le temps (1995-2005)

IV.2.2.1.1. Evolution annuelle des apports liquides

L'examen des données relatives aux apports annuels montre que l'année 2003 est l'année où on a enregistré le maximum d'apports (325.90 hm^3) alors que le minimum a été enregistré en 2000 (10.38 hm^3).

Etant donné que la station pluviométrique au niveau du barrage ne permet pas de contrôler l'ensemble des apports du barrage, ceci explique la légère différence entre les deux courbes au début du cycle (Figure IV-8).

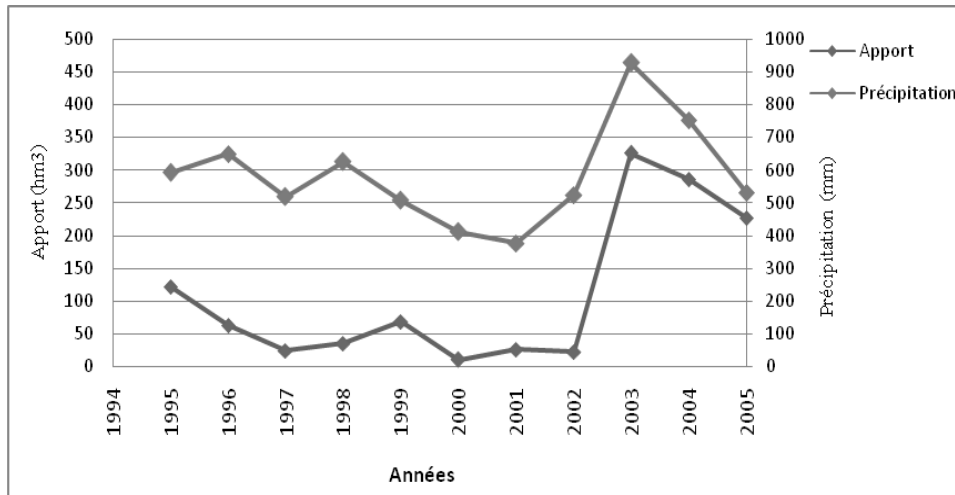


Figure IV-8 : Evolution annuelle des apports-précipitations

IV.2.2.1.2. Evolution mensuelle des apports liquides

L'évolution des apports moyens mensuels interannuels montre que la valeur la plus élevée coïncide avec le mois de janvier (36.44 hm^3) alors que la valeur minimale coïncide avec la saison sèche au mois d'août (0.10 hm^3). Figure IV-9. A l'échelle du cycle, la valeur maximale a été observée au mois de décembre (130.29 hm^3) en 2003 et la valeur minimale a été observée aux mois de juin, juillet, août et septembre (0 hm^3).

IV.3. La variation du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations dans le temps

IV.3.1. La variation annuelle du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations

La variation des précipitations et du volume d'eau de la retenue d'une année à une autre montre que l'année 2004 est l'année où on enregistre le maximum de volume avec 176.28 hm^3 cependant le minimum a été enregistré en 2002, avec 55.20 hm^3 . Par contre le max des précipitations est enregistré en 2003 avec 925 mm, et un minimum est enregistré en 2001 avec 376.2 mm (Figure IV-10).

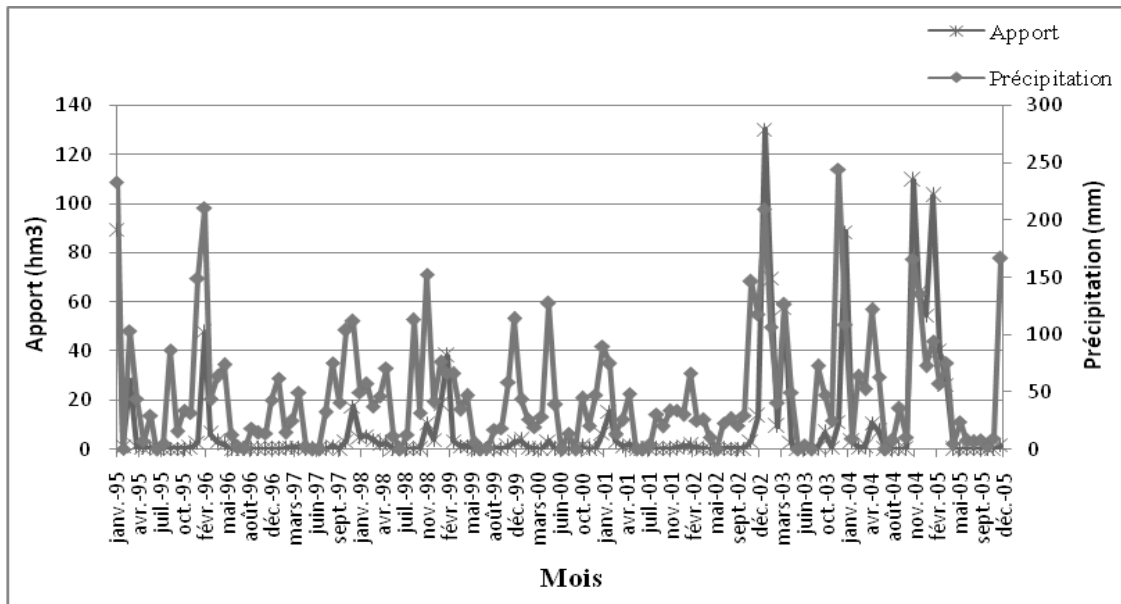


Figure IV-9 : Evolution mensuelle des apports liquides-précipitation

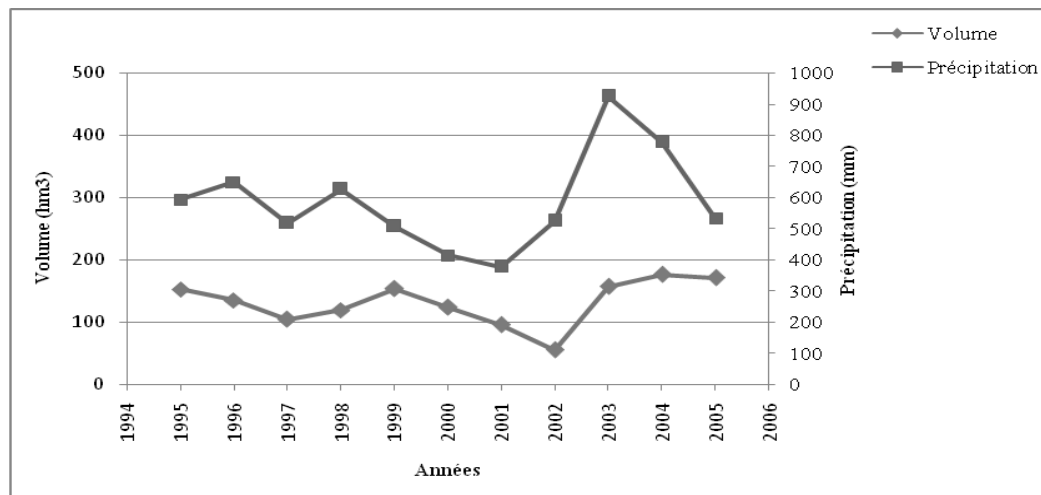


Figure IV-10: La variation annuelle du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations

IV.3.2. La variation mensuelle du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations

A l'échelle de tout le cycle, la valeur maximale de la moyenne mensuelle de volume d'eau de la retenue a été observée au mois de janvier (187.35 hm³) en 2005 et la valeur minimale a été observée aux mois de novembre (32.78 hm³) en 2002. (Figure IV-11).

A l'échelle annuelle et mensuelle, notons que la variation de volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations reflète un phénomène d'un écoulement retardé (dans le temps).

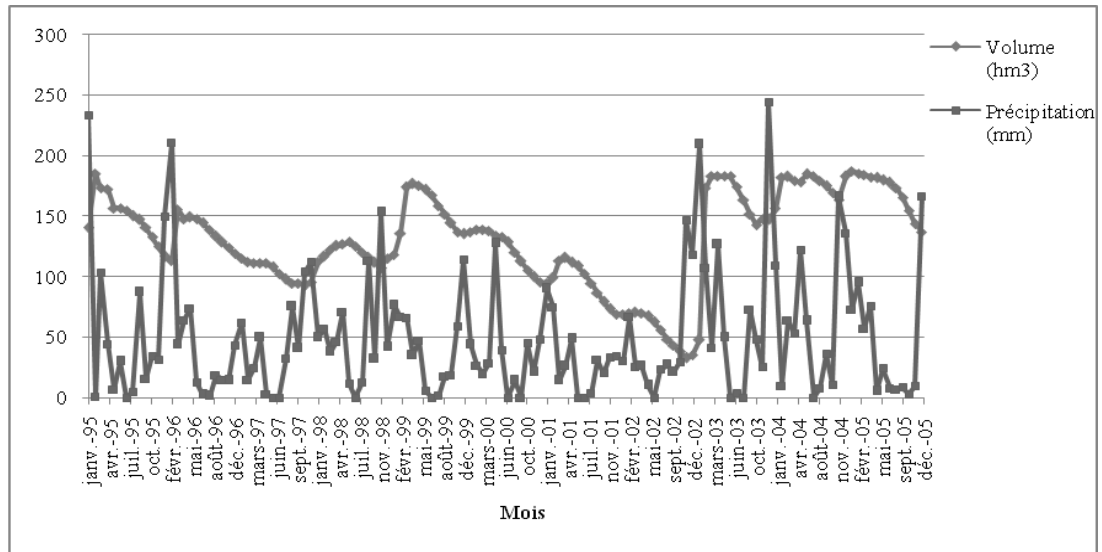


Figure IV-11 : La variation mensuelle du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations

IV.4. Bilans hydrologique

IV.4.1. Estimation des paramètres du bilan hydrologique

IV.4.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

IV.4.1.1.1. Formule de THORNTHWAITE

Selon Roche (1963): L'ETP correspond à l'évaporation d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques ». Ce paramètre est calculé par plusieurs méthodes, la plus répandue est celle de C.W. THORNTHWAITE présentée, en 1948, et qui ne tient compte que de la température.

$$ETP = 16 (10 t/I)^a \quad (\text{Equation IV-2})$$

Où : *ETP* : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

t : température moyenne mensuelle (°C).

I : indice thermique annuel.

$$I = \sum i \quad \text{Où } i : \text{indice thermique mensuel ; } i = (t/5)^{1.514}$$

a: exposant climatique donné par L. Serra en 1954, $a = 0.016 I + 0.5$

Certains auteurs pensent que les valeurs de l’ETP calculées par la méthode de THORNTHWAITE sont ou bien sous estimées dans les régions arides et semi-arides, ou bien surestimées dans les régions tropicales humides et équatoriales, pour cette raison l’ETP est multipliée par un facteur de correction K donné par les tables et qui est fonction du temps, du mois et de la latitude du lieu. Un tel calcul a été reporté dans le tableau IV.2.

$$ETP_c = K * ETP \quad (Equation IV-3)$$

Où *ETP* : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

ETP_c : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée (mm).

K : facteur de correction.

Tableau IV- 2 : Calcul de l’ETP selon la formule de THORNTHWAITE

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Année
T(°C)	24,52	20,23	13,73	10,04	9,06	10,15	13,75	16,37	21,34	26,37	29,74	29,38	18.72
<i>i</i>	11,10	8,30	4,62	2,87	2,46	2,92	4,63	6,02	9,00	12,40	14,87	14,60	/
$I = \sum i$	93.79												/
$a = 0.016 I + 0.5$	2												/
ETP (mm)	109	74	34	18	15	19	34	49	83	126	161	157	880
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP_c (mm)	112	72	29	15	13	16	35	54	100	154	200	182	982

IV.4.1.1.2. Formule de TURC

Selon cette méthode, dans une zone où l’atmosphère n’est pas très sèche (humidité relative > 50 %) l’évapotranspiration potentielle mensuelle est égale à :

$$ETP = 0.40 (I_g + 50) t / (t + 15) \quad (Equation IV-4)$$

Où *ETP* : évapotranspiration potentielle mensuelle (mm) ; exceptionnellement le coefficient 0.4 est réduit à 0.37 pour le mois de février.

t : température moyenne mensuelle du mois considéré (°C).

I_g : Radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale ; exprimée en calories/cm²/jour. *I_g* s'obtient en fonction de la durée d'insolation *h*, d'après:

$$I_g = I_{gA} (0.18 + 0.62 h/H)$$

Où *I_{gA}* : radiation globale quotidienne moyenne, si l'atmosphère n'existait pas (valeur qui ne dépend que de la latitude et qui est fournie par des tables

h : durée quotidienne moyenne de l'insolation pendant le mois considéré.

H : durée astronomique du jour en heure par mois (déterminée uniquement par la latitude et fournie par des tables.

Les valeurs de l'ETP calculées par la formule de Turc sont reportées dans le Tableau IV-3 :

Tableau IV-3 : Calcul de l'ETP selon la formule de TURC

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Année
t (°C)	24,52	20,23	13,73	10,04	9,06	10,15	13,75	16,37	21,34	26,37	29,74	29,38	18.72
I_{gA}	742	586	446	381	422	547	710	853	947	981	957	872	/
H	373	360	306	302	311	307	371	388	437	437	444	418	/
h	245,60	204	165,40	152,32	161,23	176,64	210,59	223,01	278,29	292,71	358,60	320,30	/
I_g	436,47	311,36	229,75	187,72	211,60	293,59	377,67	457,51	544,36	583,98	651,48	571,24	/
ETP (mm)	120,73	83,00	53,48	38,13	39,40	51,31	81,82	105,94	139,61	161,64	186,52	164,51	1226,07

IV.4.1.1.3. Comparaison des deux formules antécédentes

La relation de TURC est l'une des équations empiriques les plus simples à utiliser pour estimer l'évapotranspiration de référence (ETP) dans les zones qualifiées de climat humide (Trajkovic, 2009). Cependant, cette relation surestime les valeurs de l'ETP aux endroits humides caractérisés par des vitesses du vent relativement faibles comme elle sous-estime l'ETP au contraire, aux endroits humides et venteux (Trajkovic et Kolakovic,

2009). L'influence de l'exposition au vent a été soulevée auparavant par plusieurs auteurs. Pour l'Algérie cette constatation a été signalée par (Laborde, 1997). (Benahmed, 2012)

Donc la formule de TURC est à écarter pour l'utilisation à Oued Bouhamdene (climat subhumide). Par conséquent la formule de THORNTHWAITE pour l'ETP est mieux placée que celle de TURC pour notre région. Nous allons appliquer la formule de THORNTHWAITE, qui est universellement appliquée pour le calcul des bilans hydrologiques.

IV.4.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR), ou déficit d'écoulement

L'évapotranspiration réelle (ETR), est appelé souvent déficit d'écoulement (DE), est définie comme étant la quantité d'eau évaporée ou transpirée effectivement par le sol, les végétaux et par les surfaces d'eau libre. Elle dépend de l'aération et de la quantité d'eau disponible.

Pour l'estimation de l'ETR, on a utilisé deux formules qui utilisent la température et les précipitations.

IV.4.1.2.1. Formule de COUTAGNE

C'est une formule qui fait intervenir les précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes annuelles.

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad (\text{Equation IV-5})$$

Où ETR : évapotranspiration réelle (mm).

P : précipitation moyenne annuelle (mm), soit 585 mm.

λ : facteur dépendant de la température moyenne annuelle ; $\lambda = 1/(0.8+0.14T)$

Cette formule ne sera valable qu'après la vérification de la condition suivante :

$$1/8 \lambda < P < 1/2 \lambda$$

$$\lambda = 1 / (0.8+0.14*18.72) \implies \lambda = 0.292$$

Donc

$$0.428 < P < 1.712$$

Donc la condition : $0.428 < P < 1.712$ est satisfaite.

$$\Rightarrow ETR = 0.585 - 0,292 (0,585)^2$$

$$ETR = 0.485 \text{ m} = 485 \text{ mm}$$

Les précipitations annuelles sont égales à 585.56 mm, on a une ETR = 485mm, soit 82.82 % des précipitations.

IV.4.1.2.2. Formule de TURC

C'est la méthode la plus répandue, elle tient compte des précipitations et des températures moyennes annuelles.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (\text{Equation IV-6})$$

Où **ETR**: évapotranspiration réelle (mm).

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

L : le pouvoir évaporant de l'atmosphère ;

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

T : température moyenne annuelle (°C).

La valeur de l'ETR calculée selon la méthode de Turc est : 537.77 mm, L= 1096.

Les précipitations annuelles sont égales à 585.56 mm, on a une ETR = 536.16 mm, soit 91.56 % des précipitations.

IV.4.3. Application

IV.4.3.1. Bilan hydrologique de THORNTHWAITE

Le bilan hydrologique établi mensuellement selon la méthode de C.W. THORNTHWAITE a l'avantage d'estimer pour chaque mois: l'évapotranspiration réelle (**ETR**), la réserve facilement utilisable (**RFU**), le déficit agricole (**Da**) et l'excédent (**Ex**). La **RFU** est calculée à l'aide de la formule de Hallaire (1960) donnée ci-dessous :

$$RFU = 1/3 (Da \times He \times Pr) \quad (\text{Equation IV-7})$$

Où : RFU : réserve facilement utilisable en (mm).

Da : densité apparente du sol, (Hallaire propose de prendre $Da = 0,9$).

He : Capacité de rétention:

$He = 5\%$ pour un sol sablo limoneux

$He = 10\%$ pour un sol limoneux

$He = 20\%$ pour un sol argilo limoneux

Pour notre cas et vu la nature du sol, on a adopté le dernier cas.

$He = 20\%$ soit 0.2

Pr : Profondeur de la terre parcourue par les racines en (m) ; $Pr = 1$ m.

La RFU ainsi calculée pour la région est égale à 60 mm.

Le procédé de calcul pour le bilan, consiste en les étapes suivantes :

Le bilan hydrologique, selon la méthode de THORNTHWAITE est représenté dans le Tableau IV-4.

L'examen du Tableau IV-4 montre que:

- A l'échelle annuelle, l'ETP dépasse largement les précipitations, elle représente presque le double des précipitations.
- l'examen de l'ETP à l'échelle mensuelle, montre l'existence de deux saisons bien distinctes : l'une pendant laquelle les précipitations sont supérieures ou égale à l'ETP (novembre - février), durant cette période, les précipitations atteignent leur maximum et l'ETP enregistre ses valeurs les plus faibles, et la seconde où ces paramètres évoluent en sens inverse et qui d'étale de mars à octobre.

- Pendant la saison froide, les précipitations couvrent les besoins de l'évapotranspiration potentielle et permettent la reconstitution de la RFU.
- A partir du mois de Mai on a un épuisement de la RFU, ce qui se traduit par un déficit agricole. A partir du mois de novembre on assiste à une reconstitution du stock, qui atteint son maximum au mois de décembre et demeure ainsi jusqu'au mois de mars où la réserve commence à diminuer jusqu'à épuisement du stock.
- On remarque que le déficit agricole correspondant à la période de juin à octobre avec un maximum de 196 mm enregistré au mois de juillet.

Tableau IV-4: Bilan hydrologique de THORNTHWAITE

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Année
T(°C)	25	20	14	10	9	10	14	16	21	26	30	29	19
P (mm)	44	25	70	99	103	66	45	52	51	17	4	10	586
ETPc (mm)	112	72	29	15	13	16	35	54	100	154	200	182	982
P - ETPc (mm)	-68	-47	41	84	90	50	10	-2	-49	-137	-196	-172	/
RFU (mm)	0	0	41	60	60	60	60	58	9	0	0	0	348
ETR (mm)	44	25	29	15	13	16	35	54	100	26	4	10	371
DA (mm)	68	47	0	0	0	0	0	0	0	128	196	172	611
EX (mm)	0,00	0,00	0,00	65	90	50	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	215

IV.4.4. Estimation du bilan d'eau

La formule générale du bilan d'eau donne l'égalité des apports et des pertes évaluées sur de grandes périodes. La formule du bilan est la suivante :

$$P = ETR + R + I + \Delta W \quad (\text{Equation IV-8})$$

Où : P : La hauteur de la précipitation annuelle en (mm).

R : Le ruissellement de surface annuel en (mm).

ETR : L'évapotranspiration réelle annuelle en (mm).

I : L'infiltration annuelle (mm).

ΔW : La variation de réserves en (mm), souvent négligeable.

IV.4.4.1. Les différentes composantes du bilan**IV.4.4.1.1. Le ruissellement**

Le ruissellement correspondant à la part des précipitations qui s'écoule directement sur le sol lors des précipitations. Il peut donc être connu d'une façon générale par analyse de l'hydrogramme d'un cours d'eau où à l'aide des méthodes empiriques qui donnent une valeur approchée. Parmi les méthodes empiriques on peut citer celle de Tixeront et Berkaloff. Ces auteurs ont établi une formule qui permet d'étudier le ruissellement moyen annuel. Cette formule tant qu'elle ne tient pas compte de la nature lithologique des terrains et l'influence de la perméabilité, reste toujours discutable. Elle s'écrit de la manière suivante:

$$R = P^3 / 3ETP^2 \quad (\text{Equation IV-9})$$

Où : R : Le ruissellement moyen annuel en (mm).

P : La hauteur des précipitations annuelles en (mm).

ETP : L'évapotranspiration potentielle annuelle en (mm).

L'application de la dite formule a donné de résultat qui a été consignés dans le Tableau IV-5.

IV.4.4.1.2. Estimation de la lame d'eau infiltrée

L'infiltration désigne le mouvement de l'eau pénétrant dans les couches superficielles du sol et du sous-sol, sous l'action de la gravité et effets de la pression. La lame d'eau infiltrée est souvent déduite à partir des autres paramètres à l'aide de la formule suivante:

$$I = P - (ETR+R) \quad (\text{Equation IV-10})$$

A partir des données précédentes, nous avons abouti aux résultats du Tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Les composantes du bilan hydrologique.

Période Paramètres	1995-2005
ETR (mm)	371
P (mm)	586
R (mm)	69.55
Infiltration I (mm)	145.45

Conclusion

La zone d'étude est caractérisée par un climat tempéré subhumide, le régime climatique est tranché en deux saisons : une saison fraîche et humide où les précipitations sont supérieures à la moyenne mensuelle de l'année, et une saison chaude et sèche où les précipitations sont inférieures à la moyenne mensuelle de l'année. Ceci influe sur le chimisme des eaux du barrage de Hammam Debagh par dilution pendant les périodes pluvieuses et par concentration due à l'évaporation durant les périodes sèches. L'examen des précipitations et des températures de la station pluviométrique du barrage a donné des résultats spécifiques au bassin de Oued Bouhamdene avec :

- Une précipitation moyenne annuelle de l'ordre de 585.56 mm.
- Une température moyenne annuelle de l'ordre de 18.72 °C.
- Un apport moyen annuel de l'ordre de 110.02 hm³
- A l'échelle annuelle et mensuelle, la variation des précipitations en fonction des apports et de volume d'eau de la retenue, reflète un phénomène de transfert retardé de la pluie
- La formule de THORNTHWAITE pour l'ETP est mieux adaptée que celle de TURC dans le bassin de oued Bouhamdene (climat subhumide).
- La valeur de l'ETR calculée par la méthode de THORNTHWAIT est la plus proche de la réalité.
- Un déficit agricole de l'ordre de 611 mm. Notons que le bilan hydrologique est déficitaire, et l'alimentation se fait latéralement soit par les bassins voisins, soit par drainage.
- Le ruissellement et l'infiltration totalisent environ 36 % des précipitations (soit 215 mm).

Chapitre V

HYDROCHIMIE

Introduction

L'eau de surface englobe toutes les eaux qui circulent ou qui sont stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique de ces eaux dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours et de la composition chimique des effluents qui s'y déversent. Les écoulements de surface constituent la cause essentielle de la turbidité et de la teneur en matières organiques, des débris d'origine végétale ou animale, ainsi que des micro-organismes pathogènes des eaux de surface. C'est ainsi que les eaux de surface sont objets des pollutions physico-chimiques et microbiennes (Ahonon, 2011).

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, qui détermine la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (irrigation, industrie etc..). (Ziani, 2009).

Le but de ce chapitre est d'étudier la variation de la composition chimique à l'aide de diverses techniques telles que l'analyse en composantes principales (ACP), le suivi dans le temps, la potabilité et l'utilisation en irrigation. Le degré de pollution de ces eaux par l'azote (NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+) et la demande biologique (DBO_5), la demande chimique (DCO), l'oxygène dissous ($\text{O}_{2\text{-dis}}$), la matière en suspension (MES) est également abordé. Pour cela, un certain nombre de diagrammes ont été élaborés et serviront de base à l'interprétation générale des résultats d'analyses chimiques.

L'étude a porté sur l'analyse et l'interprétation d'échantillons d'eau prélevés au pas mensuel entre décembre 1999 et janvier 2004 au niveau de la cuvette du barrage de Hammam Debagh. Les données physico-chimiques (pH, conductivité électrique de l'eau (CE), calcium (Ca^{++}), magnésium (Mg^{++}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^-), bicarbonates (HCO_3^-), nitrates (NO_3^-), nitrites (NO_2^-), orthophosphates

(PO_4^{3-}), ammonium (NH_4^+), la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène au bout de 5 jours (DBO_5), la matière organique (MO), oxygène dissous ($\text{O}_{2\text{dis}}$) et la matière en suspension (MES)), la variation de la réserve d'eau au niveau de la retenue (VOL), les précipitations (P), la température de l'eau de la retenue du barrage de Hammam Debagh (T_{eau}) et la température de l'air (T_{air}), constituent une série chronologique de 35 analyses et de 22 variables. Dans la région étudiée, le terrain naturel contient des sels plus ou moins solubles, certains minéraux s'altèrent au contact de l'eau. Ainsi le chimisme des eaux de surface dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour.

V.1. Caractérisation des eaux du barrage

L'analyse statistique des données (Tableau V-1) montre que les valeurs de la moyenne et la médiane sont très proches ce qui témoigne de la représentativité de la moyenne et de la distribution symétrique des échantillons.

L'examen de l'écart type et du coefficient de variation, montre que :

- les paramètres physiques (CE, pH et RS, HCO_3^- et $\text{O}_{2\text{dis}}$) sont affectés d'une faible variation (<20%) autour de la moyenne ;
- Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} présentent quant à eux, une variation autour de la moyenne comprise entre 20 et 30 % ;
- Le reste des éléments (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , DCO, DBO_5 et MES) présentent une forte variation autour de la moyenne (>30%).

V.2. Les facies chimiques

L'interprétation des résultats des analyses a pour but de déterminer les facies chimiques et d'effectuer une comparaison temporelle. Parmi les méthodes graphiques les plus utilisées, celle de SCHOELLER-BERKALOFF (1935-1938) et celle de PIPER (1944).

Tableau V-1 : Caractéristiques statistiques des éléments physico-chimiques et biologiques.

Éléments considérés	Valeur maximale	Valeur minimale	Moyenne	Médiane	Ecart type	Coefficient De variation
T_{eau}	28	8.5	18.66	18	6.33	0.34
pH	8.6	7.5	8.09	8.1	0.26	0.03
CE	900	500	654,29	700	90,53	0,14
O ₂ -dis	100	63.2	85,45	87.15	11,13	0,13
MES	260	40	80,00	60	47,58	0,59
Rs	580	340	444,60	457	50,16	0,11
Ca ⁺⁺	100	18	59,43	58	19,97	0,34
Mg ⁺⁺	62	7	23,69	20	13,93	0.59
Na ⁺	68	12	45,60	48	11,82	0.26
K ⁺	9	1	3,03	3	1.42	0,47
Cl ⁻	90	35	62,14	60	14,51	0.23
SO ₄ ⁻	220	50	123,03	114	37,42	0.30
HCO ₃ ⁻	183	122	152,54	153	19,85	0.13
NO ₃ ⁻	28	0	7,69	7	5,59	0,73
NO ₂ ⁻	0.19	0	0,02	0	0,04	1,98
NH ₄ ⁺	1.4	0	0,07	0.02	0,24	3.28
PO ₄ ³⁻	1	0	0,28	0.3	0.22	0,79
DCO	49	6	28,85	29	10,05	0.35
DBO ₅	5.5	0.5	2,91	2.8	1,36	0.47

Le diagramme de PIPER permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eaux. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. Il permet de présenter sur un même schéma un grand nombre d'analyses qui peuvent être comparées visuellement de façon simple. Ce type de diagramme est particulièrement adapté pour étudier l'évolution du faciès des eaux lorsque la minéralité augmente ou pour distinguer des groupes d'échantillons.

Le diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques.

Un groupe d'eau de minéralisation variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles.

Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence. Il est ainsi possible de visualiser à la fois le faciès chimique, comme pour le diagramme de Piper, mais aussi la minéralisation de l'eau (sa charge dissoute), ce qui est appréciable. Toutefois, la visualisation du faciès est moins aisée qu'avec le diagramme de PIPER.

Les résultats d'analyses physico-chimiques sont présentés sous forme de deux diagrammes qui autorisent une interprétation aisée.

V.2.1. Faciès chimique selon PIPER :

A partir des résultats des analyses chimiques, le diagramme de PIPER (Figure V-1) permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux superficielles du barrage de Hammam Debagh. Il montre que les eaux présentent une seule famille chlorurée et Sulfatée calcique et magnésienne.

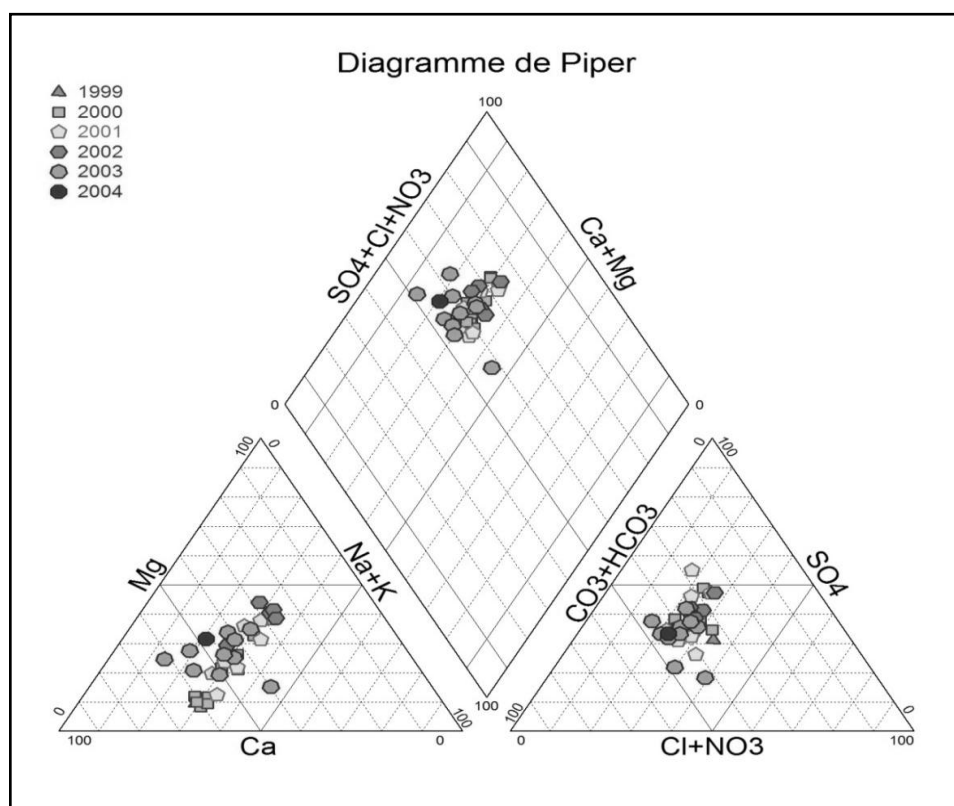


Figure V-1: Diagramme de Piper des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh

V.2.2. Faciès chimique selon SCHOELLER -BERKALOFF

Le diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF montre la même allure des courbes ce qui permet de dire que les eaux ont la même minéralisation. Les teneurs des différents éléments chimiques majeurs sont très rapprochées.

Les diagrammes (2000-2001-2002-2003) montrent que les eaux sont de nature sulfatée calcique et magnésienne et bicarbonatée calcique. (Tableau V-2 et Figures V-2 à V-5).

Selon ces deux diagrammes, on peut dire que les eaux du barrage de Hammam Debagh sont marquées par les sulfates qui s'accompagnent tantôt de calcium tantôt de magnésium et parfois de bicarbonates. Ceci est en liaison directe avec les rejets urbains qui génèrent les sulfates et la géologie marquée par la présence des marnes gypseuses et des formations carbonatées.

Tableau V-2 : Classification des eaux selon SCHOELLER-BERKALOFF

Année	Formules caractéristiques		Faciès chimiques
Année 2000	SO ₄ >HCO ₃ >Cl>NO ₃	Ca ⁺⁺ >Na ⁺ +K ⁺ >Mg ⁺⁺	Sulfate Calcique
Année 2001	SO ₄ >Cl>HCO ₃ >NO ₃	Ca ⁺⁺ >Mg ⁺⁺ >Na ⁺ +K ⁺	Sulfate Calcique
Année 2002	SO ₄ >HCO ₃ >Cl>NO ₃	Mg ⁺⁺ >Na ⁺ +K ⁺ >Ca ⁺⁺	Sulfate Magnésium
Année 2003	HCO ₃ >SO ₄ >Cl>NO ₃	Ca ⁺⁺ >Na ⁺ +K ⁺ >Mg ⁺⁺	Bicarbonate Calcique

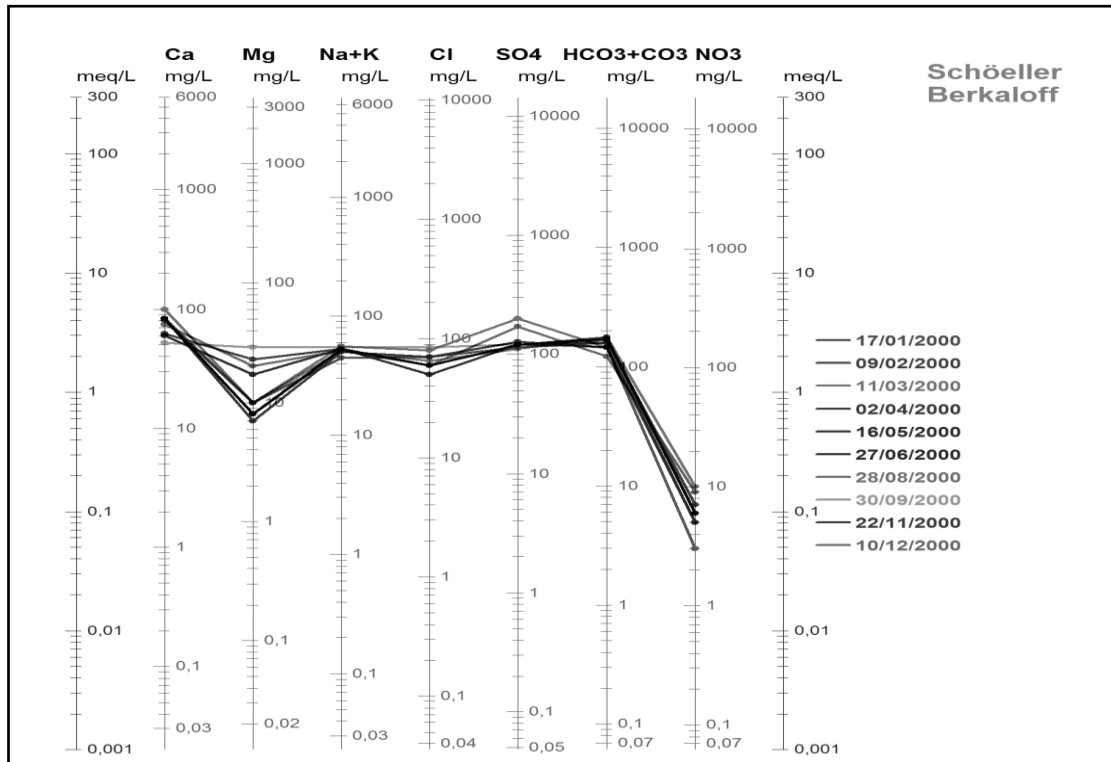


Figure V-2: Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh. (2000)

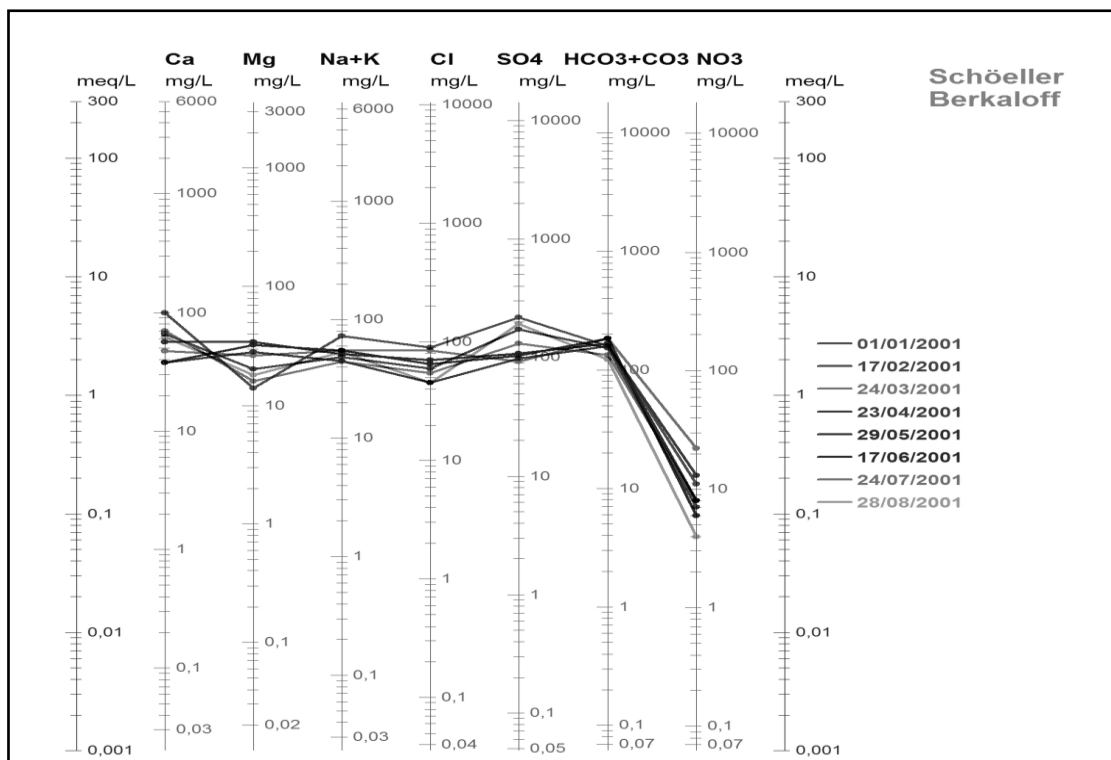


Figure V-3 : Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh (2001)

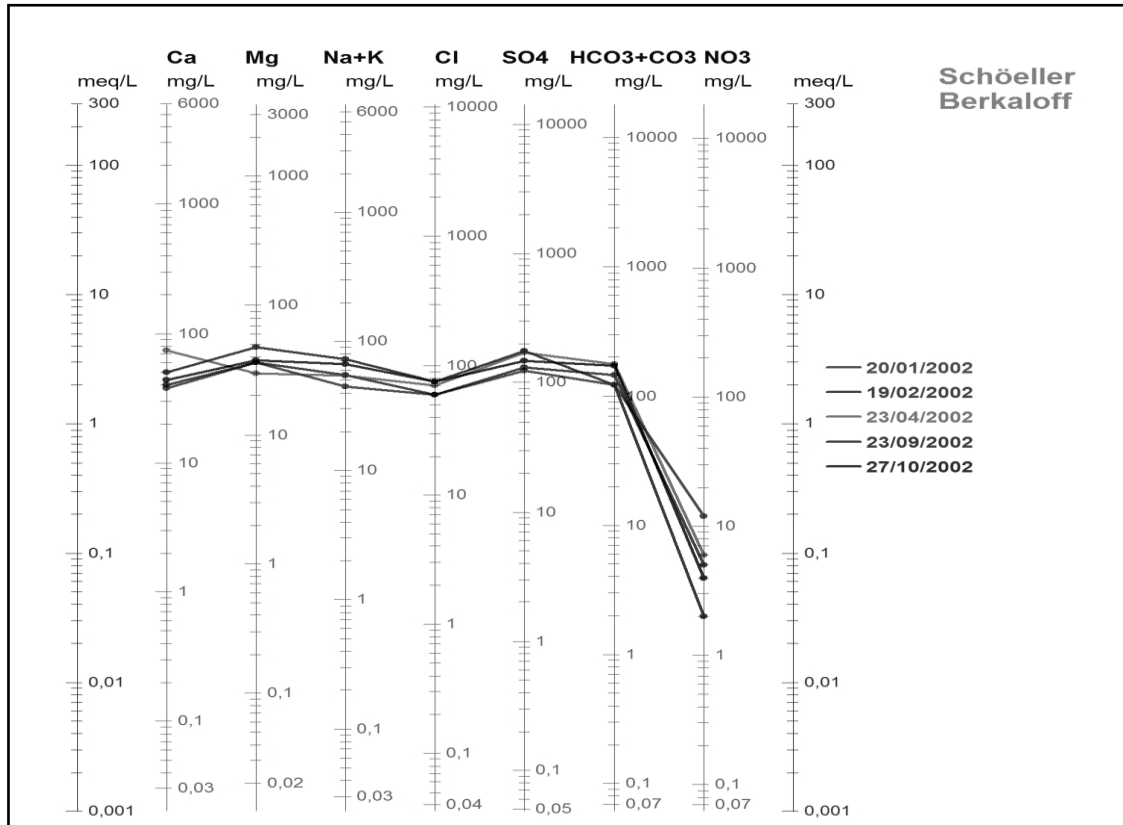


Figure V-4 : Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh (2002)

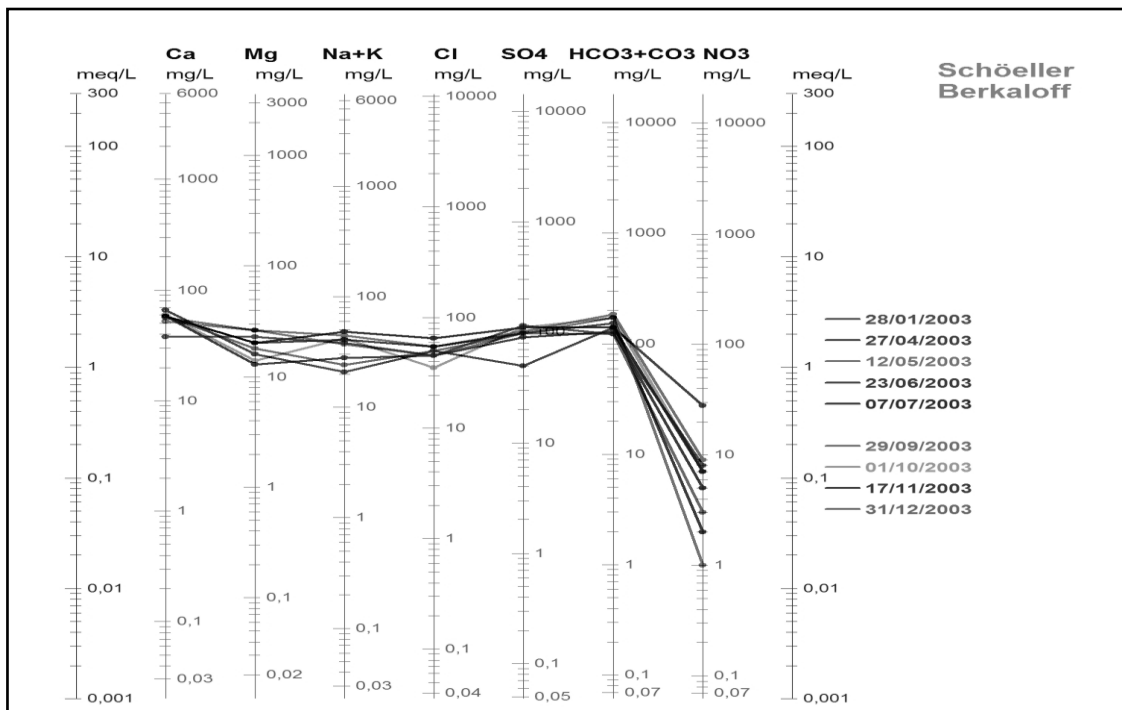


Figure V-5 : Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh (2003)

V.3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Il existe plusieurs méthodes statistiques qui permettent de résumer l'information contenue dans une matrice de données. Parmi celles-ci, l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette technique permet de réduire le nombre de variables et de détecter une structure dans les relations entre variables, ce qui revient à ordonner les variables. Par conséquent, l'ACP est utilisé comme une méthode de synthèse des données, ou de détection de structure (Tessier, 2003).

V.3.1. Principe de l'ACP

L'ACP consiste à remplacer une famille de variables par de nouvelles variables de variance maximale, non corrélées deux à deux et qui sont des combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces nouvelles variables, appelées composantes principales, définissent des plans factoriels qui servent de base à une représentation graphique plane des variables initiales. L'interprétation des résultats se restreint généralement aux deux ou trois premiers plans factoriels, sous réserve que ceux-ci expliquent la majeure partie de la variance du nuage des variables initiales.

V.3.2. Conditions d'utilisation de l'ACP

L'utilisation de l'ACP implique une stratégie déterminée d'analyse de données. En tout premier lieu, il convient de sélectionner les échantillons (observations) et les variables (éléments, débits, taille des bassins versants...) que nous voulons exploiter conformément à l'objectif fixé. Une fois la thématique de l'analyse définie, la matrice de données constituée (tableau des données d'entrées) est contrôlée au regard de divers critères. (Tessier, 2003)

- 1- La forme de la matrice doit être telle que le nombre d'observations n soit supérieur au nombre de variables p .
- 2- La matrice ne doit pas comporter de valeurs manquantes et l'ordre de grandeur des variables doit être examiné.
- 3- Les variables doivent être continues.
- 4- Les relations éventuelles entre les variables doivent être de type linéaire.

V.3.3. Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh

L'ensemble des procédures et techniques utilisées sert à identifier et quantifier la liaison entre les différents échantillons prélevés pendant la période (décembre 1999 - janvier 2004). Cette analyse a été appliquée au traitement de ces données chimiques bien que l'ACP est une méthode exploratoire et descriptive (Dagnélie, 2006). L'analyse effectuée est une ACP centrée réduite normée qui a été réalisée sur un tableau de 10 variables (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^- , HCO_3^- , NO_3^- , RS et VOL) et de 35 individus, échantillons prélevés au niveau du barrage de Hammam Debagh. Cette analyse a été effectuée à l'aide du logiciel STATISTICA.

Le critère de Kaiser (Kaiser, 1960) a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère, seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données. Quatre composantes principales CP ont été retenues et les résultats montrent que ces quatre CP représentent 84.80 % de la variance totale, ce qui est assez bon et peut être utilisée pour identifier les principales variations dans l'hydrochimie (Tableau V-3).

Tableau V-3 : Pourcentage de variance exprimée.

Facteurs	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	3.552	2.045	1.690	1.190
Variance partielle (%)	35,521	20,456	16,909	11.917
Variance cumulée (%)	35.521	55.978	72.878	84.805

V.3.3.1. Matrice de corrélation

La valeur du coefficient de corrélation critique « r » dépend du nombre d'individus « n », dans notre cas, $n = 35$; ce nombre d'individus permet d'avoir un coefficient de corrélation critique de 0.325 (la table de Pearson) Sur cette base, plusieurs corrélateurs ont pu être mis en évidence (Tableau V-4).

Tableau V-4 : Matrice des corrélations entre les différents variables.

Variables	Rs	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	VOL
Rs	1,000									
Ca	0,282	1,000								
Mg	0,139	-0,803	1,000							
Na	0,694	0,062	0,244	1,000						
K	0,068	0,127	0,060	-0,045	1,000					
Cl	0,584	0,303	0,013	0,667	0,218	1,000				
SO4	0,600	0,291	0,185	0,555	0,031	0,290	1,000			
HCO3	0,438	0,100	-0,056	0,290	0,011	0,233	-0,160	1,000		
NO3	-0,164	-0,109	-0,016	-0,241	0,529	0,093	-0,422	0,073	1,000	
VOL	-0,576	0,172	-0,563	-0,669	-0,205	-0,410	-0,637	-0,061	0,201	1,000

Ainsi, on a pu dégager les associations suivantes :

$$RS, Na^+ \Rightarrow r = 0.694$$

$$Na^+, Cl^- \Rightarrow r = 0.667$$

$$RS, Cl^- \Rightarrow r = 0.584$$

$$Na^+, SO_4^{--} \Rightarrow r = 0.555$$

$$RS, SO_4^{--} \Rightarrow r = 0.600$$

$$Na^+, VOL \Rightarrow r = -0.669$$

$$RS, HCO_3^- \Rightarrow r = 0.438$$

$$K^+, NO_3^- \Rightarrow r = 0.529$$

$$RS, VOL \Rightarrow r = -0.576$$

$$Cl^-, VOL \Rightarrow r = -0.410$$

$$Ca^{++}, Mg^{++} \Rightarrow r = -0.803$$

$$SO_4^{--}, NO_3^- \Rightarrow r = -0.422$$

$$Mg^{++}, VOL \Rightarrow r = -0.563$$

$$SO_4^{--}, VOL \Rightarrow r = -0.637$$

La matrice de corrélation montre que le RS présente une liaison significative avec les formations salifères (Na^+ , Cl^- , SO_4^{--}). D'autres corrélations moins significatives entre RS et (HCO_3^-). Ceci permet de dire qu'on a plusieurs origines de la minéralisation qui est aussi bien liée aux rejets urbains, aux formations évaporitiques, qu'aux formations carbonatées.

Le calcium (Ca^{++}) et le magnésium (Mg^{++}) présentent une forte corrélation négative entre eux (-0.803), indiquant une origine différente.

Les éléments salifères (Na^+ , Cl^- , SO_4^-) sont également bien corrélés entre eux ce qui laisse penser qu'ils peuvent aussi avoir la même origine.

La liaison des nitrates avec les sulfates et le potassium permet de dire que la pollution agricole a un rôle dans la salinité de l'eau.

Le volume d'eau dans la cuvette du barrage a une corrélation négative avec RS, Mg^{++} , Na^+ , Cl^- et SO_4^- . Ceci traduit une évolution inverse, traduisant des phénomènes de dilution.

V.3.3.2. L'analyse des plans factoriels

L'étude des liaisons avec les variables et les différents facteurs selon le plan factoriel « **F1-F2** » qui exprime 55.97 % de la variance totale, montre que le facteur **F1** est déterminé positivement par (RS, Na^+ , Cl^- et SO_4^-) et négativement par le volume (VOL), C'est le facteur de la minéralisation. Ce groupe s'oppose au volume d'eau de la retenue qui a une action sur la teneur de ces éléments par effet de dilution.

Le facteur **F2**, qui exprime 20.456 % de la variance totale est déterminé positivement par le magnésium (Mg^{++}) et négativement par le calcium (Ca^{++}). C'est donc le facteur qui oppose les deux composants majeurs de la dureté de l'eau. (Figure V-6)

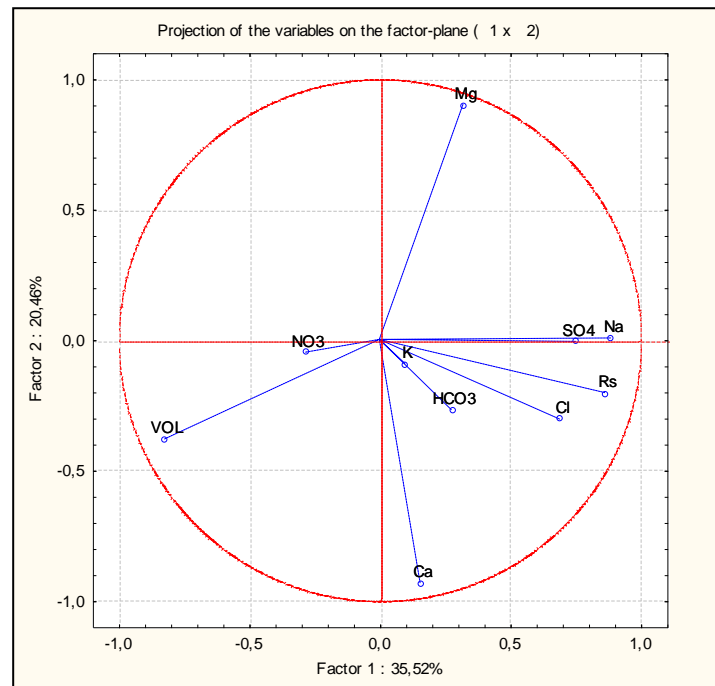


Figure V-6 : Projection des variables sur le plan factoriel **F1/F2**

L'analyse du plan factoriel « **F1-F3** » qui exprime plus de 55 % de la variance totale, est déterminé négativement par le potassium et les nitrates (K et NO_3^-), donc c'est un facteur de pollution agricole. (Figure V-7)

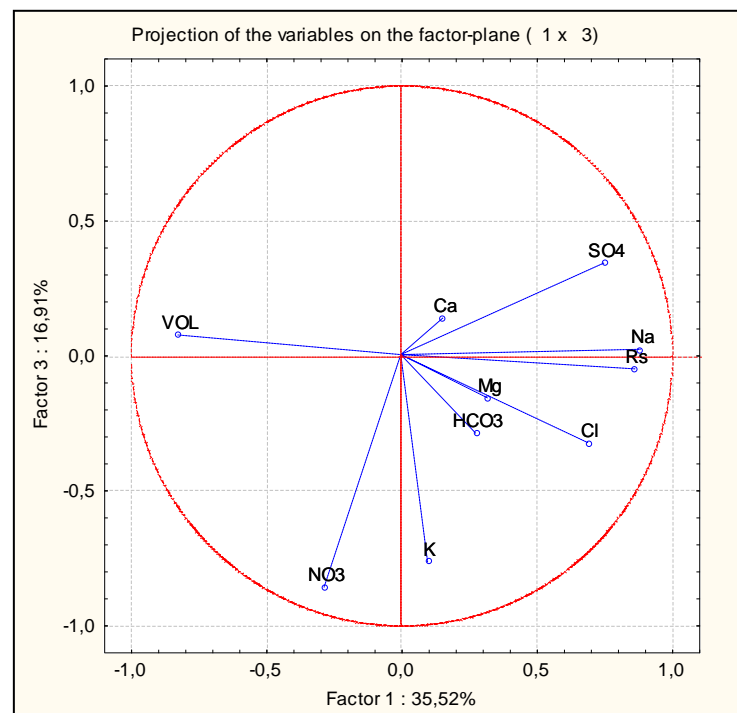


Figure V-7: Projection des variables sur le plan factoriel **F1/F3**

Sur le plan factoriel « **F1-F4** », le facteur **F4** qui exprime 11.917 % de la variance totale est fortement déterminé négativement par HCO_3^- , ces derniers ont une origine carbonatée. (Figure V-8)

Les quatre facteurs montrent que les eaux de surface du barrage de Hamma Debagh, suivent deux processus dans la dissolution des minéraux (évaporites et carbonates) suivi par une pollution agricole. Donc **F1**, **F2**, **F3** et **F4** sont supposées être représentatifs du processus d'acquisition du chimisme de l'eau lié à l'interaction eau-roche et à la pollution agricole.

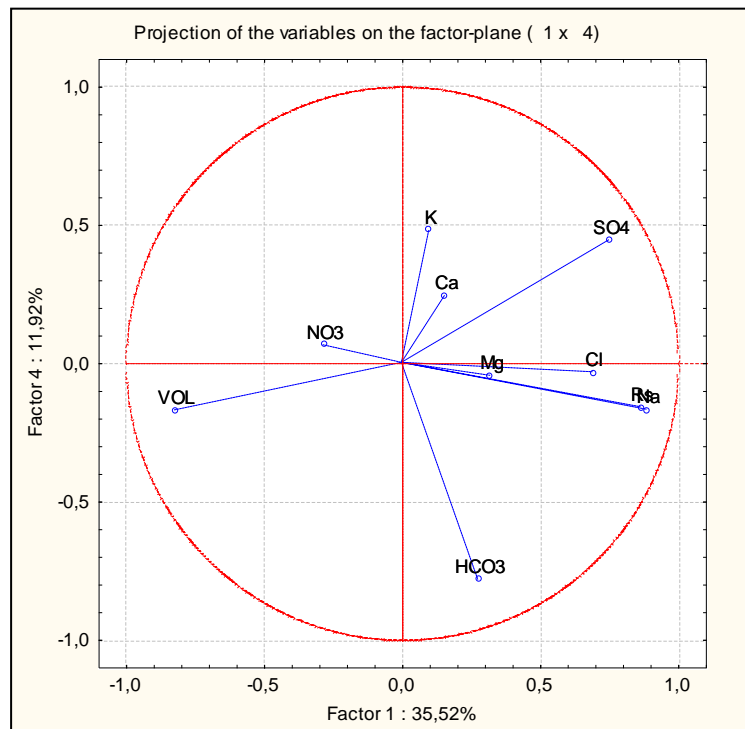


Figure V-8: Projection des variables sur le plan factoriel **F1/F4**

V.4. Evolution de la teneur des éléments physico-chimiques

Pour cerner la qualité des eaux du barrage de Hammam Debagh, on a étudié l'évolution des éléments physico-chimiques soit en fonction d'un paramètre similaire soit en fonction du volume d'eau de la retenue pendant la période d'échantillonnage (2000-2003).

V.4.1. Les paramètres physiques

V.4.1.1. La température (T °C)

La température joue un rôle primordial dans la solubilité des sels et des gaz, donc sur la conductibilité. Elle est le facteur cinétique le plus important de toutes les réactions chimiques et biologiques dans les milieux aquatiques, c'est en premier lieu le cas pour l'oxygène dissous indispensable à la vie aquatique puisque sa teneur est fonction de la température. Une température supérieure à 15°C favorise le développement des microorganismes, intensifie la biodégradation et les mauvaises odeurs (Beaudry et Henry, 1984). La température maximale de l'eau ($T_{\text{eau max}} = 28^{\circ}\text{C}$) est enregistrée pendant le mois de juillet (2003), et une température minimale ($T_{\text{eau min}} = 8.5^{\circ}\text{C}$) est enregistrée au mois de janvier (2004). A titre indicatif, la température moyenne mensuelle de l'air dans la région est de l'ordre de 18.72°C. La température maximale de l'air mesurée au cours des prélèvements ($T_{\text{max}} = 30^{\circ}\text{C}$) est enregistrée pendant le mois de juillet en 2001 et la température minimale ($T_{\text{min}} = 4^{\circ}\text{C}$) est enregistrée au mois de janvier (2000).

On remarque que les courbes de température de l'eau et celle de l'air sont de la même évolution, ce qui témoigne de l'influence du climat sur la température de l'eau du barrage. (Figure V-9)

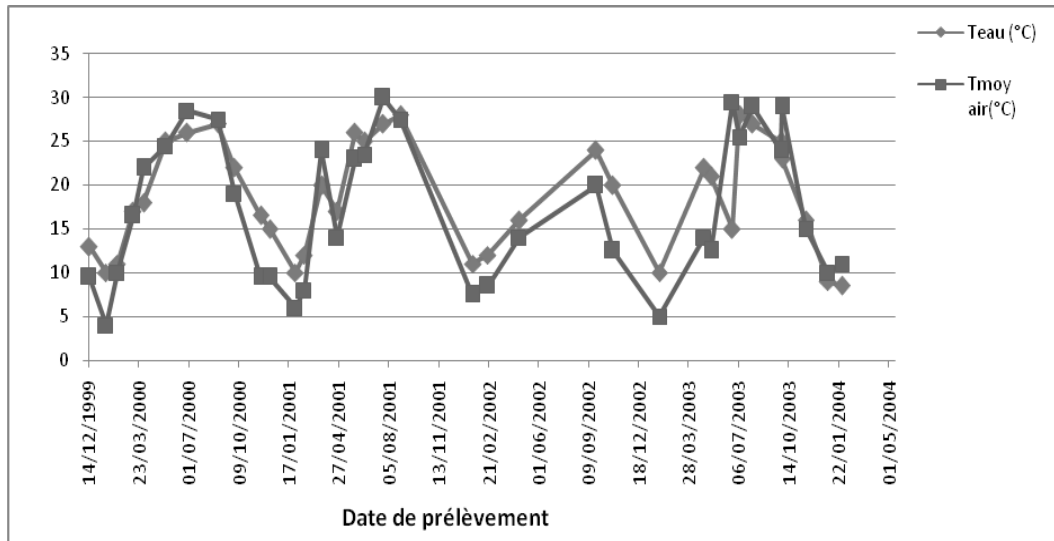
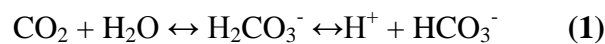


Figure V-9 : Evolution des températures de l'eau et de l'air.

V.4.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H^+). L'échelle des pH s'étend de 0 (très acide) à 14 (très alcalin); la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C. Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique par contre des pH élevés augmentent les concentrations de l'ammoniac.

Les valeurs du pH mesurées au niveau du barrage de Hammam Debagh varient entre (7.5 et 8.6). Ces valeurs évoluent en sens inverse avec la matière organique (MO). (Figure V-10). Une forte teneur en MO aboutie à l'installation des conditions de dégradation ce qui induit une baisse du pH selon la formule (1) proposée par Kempe, (1982).



Ce paramètre évolue d'une manière inverse avec le volume d'eau de la retenue suite à des phénomènes de dilution et de concentration. (Figure V-11)

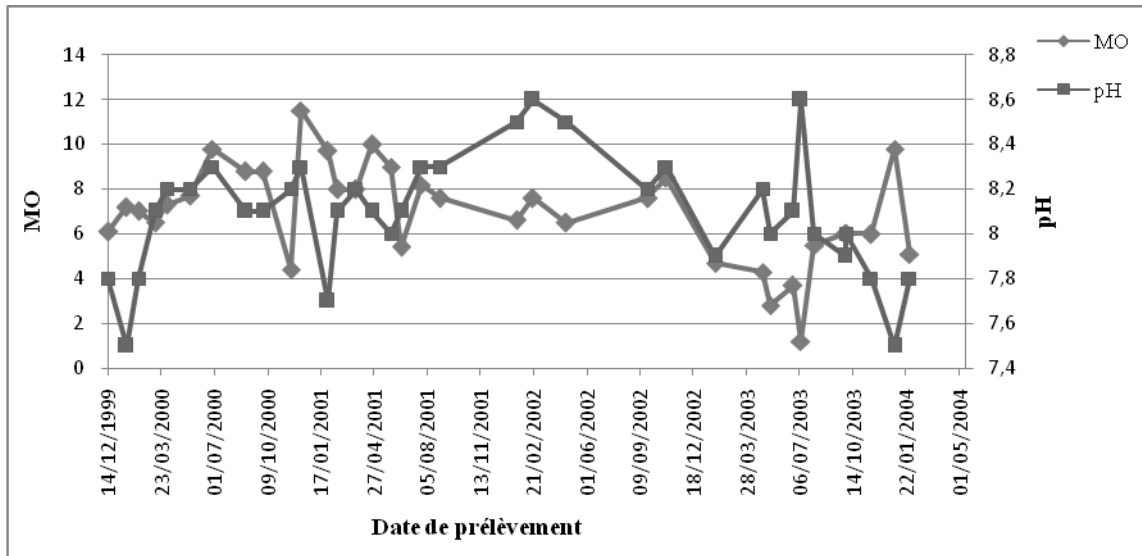


Figure V-10 : Evolution du pH en fonction de la matière organique.

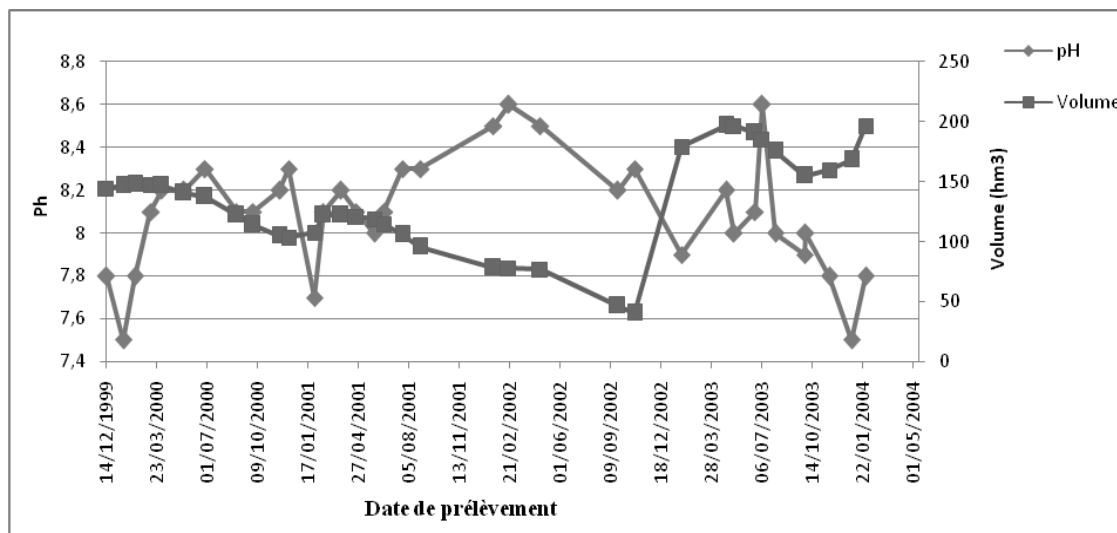


Figure V-11 : Evolution du pH en fonction du volume de la retenue d'eau.

IV.4.1.3. Conductivité électrique (CE) et du résidu sec (RS)

La conductivité électrique exprime la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des éléments dissous dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la CE permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. Une CE élevée traduit une salinité élevée. Elle est également fonction de la température de l'eau, elle augmente avec la température. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en millisiemens par cm

(ms/cm) à 20 °C. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 $\mu\text{s/cm}$ (Beaudry et Henry, 1984).

Le résidu sec exprime de la même manière que la CE, la quantité totale de sels dissous dissoute et donne donc une indication du degré de minéralisation de l'eau. Le résidu sec est obtenu après évaporation de l'eau à 180°C (Marcel, 1999). Suivant le domaine d'origine de l'eau cette teneur peut varier de moins de 100 mg/l (eaux provenant de massifs cristallins) à plus de 3000 mg/l.

On remarque que les valeurs du Rs varient entre une valeur minimale de 340 mg/l, enregistrée en janvier 2003, et une valeur maximale de 580 mg/l, enregistrée en janvier 2001. Pendant la même période, on remarque que les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre (500-900 $\mu\text{s/cm}$). La valeur maximale (900 $\mu\text{s/cm}$) est enregistrée en janvier 2001, et toutes les valeurs minimales (500 $\mu\text{s/cm}$) sont enregistrées pendant l'année 2003. L'évolution de ces deux paramètres se fait d'une manière parallèle ce qui nous semble logique. (Figure V-12)

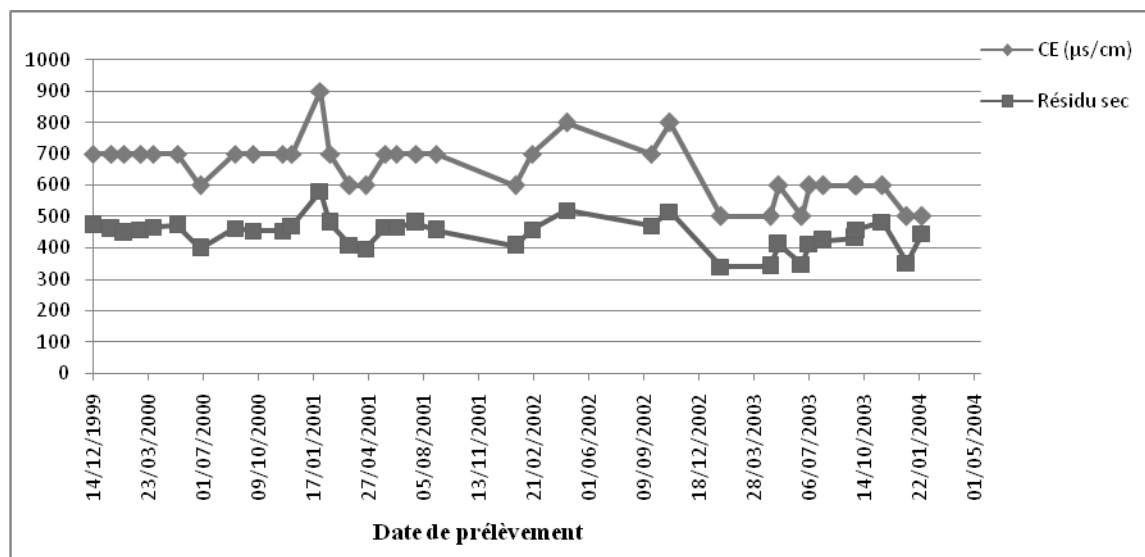


Figure V-12 : Variation de la conductivité électrique avec le résidu sec de l'eau du barrage Hammam Debagh.

La liaison minéralisation-volume d'eau de la retenue, évolue d'une manière inverse suite à des phénomènes de dilution en cas d'augmentation de la quantité d'eau dans la retenue et à des phénomènes de concentration dans le cas inverse. (Figure V-13)

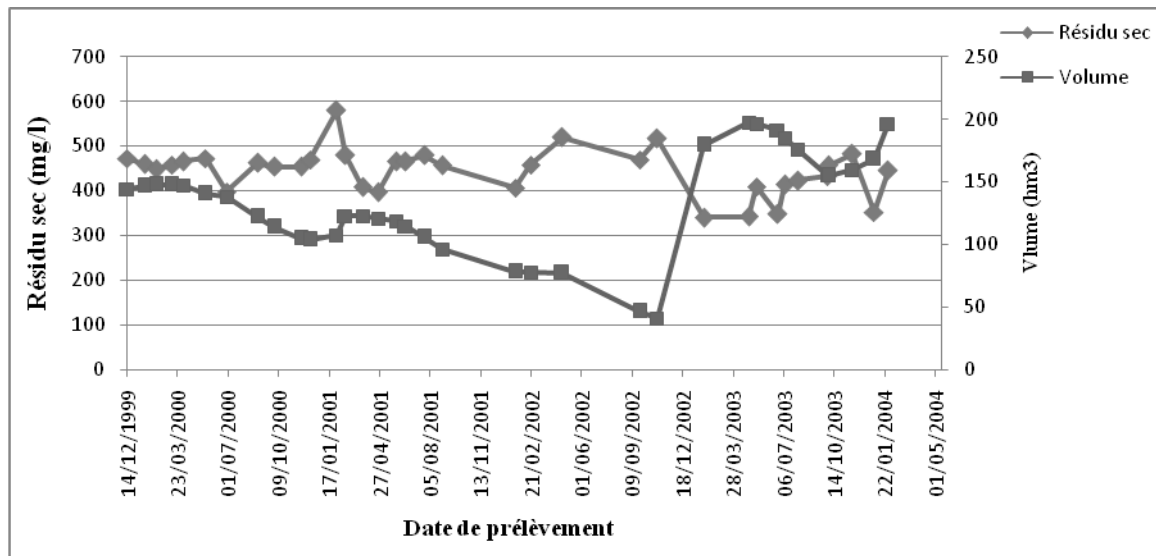


Figure V-13: Evolution de résidu sec en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.

V.4.2. Les Eléments chimiques

V.4.2.1. Les cations

V.4.2.1.1. Le calcium (Ca^{++})

Il est le composant majeur de la dureté de l'eau, et l'élément dominant des eaux naturelles. La concentration du calcium dans l'eau dépend du temps de séjour de l'eau dans des formations géologiques riches en calcium (Beaudry et Henry, 1984). La présence des ions Ca^{++} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées ($\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{++} + \text{CO}_3^-$), soit à la dissolution des formations gypseuses [$\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O}) = \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^- + 2(\text{H}_2\text{O})$]. Une teneur faible en calcium fait penser à un échange de base contre le sodium ou à l'absence de minéraux riches en calcium faiblement altérables. Par contre une teneur élevée en calcium provient de la mise en solution du gypse ou de l'anhydrite (Athamna, 2008).

On remarque que les teneurs en calcium varient entre 18 mg/l enregistrée en août 2001, et 100 mg/l enregistrée en août 2000 et janvier 2001. La concentration en calcium évolue inversement au volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-14).

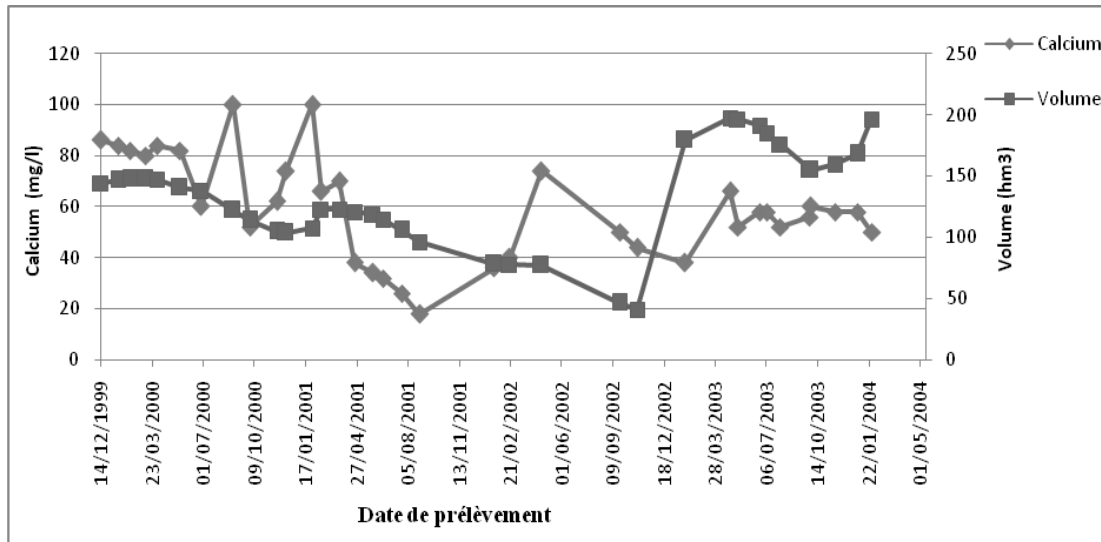


Figure V-14: Evolution de la teneur du calcium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.

V.4.2.1.2. Magnésium (Mg^{++})

C'est un élément dominant dans l'eau, les principales sources du magnésium contenu dans les eaux sont les minéraux ferromagnésiens des roches ignées et les carbonates de magnésium des roches sédimentaires (George et Harrap, 1963). Il constitue un élément significatif de sa dureté, sa teneur dépend du terrain traversé, il dépasse rarement 15 mg/l dans les eaux naturelles, par contre dans les eaux minérales il peut largement dépasser cette valeur. Dans les régions riches en roches magnésiques, l'eau peut contenir des concentrations de 10 à 50 mg/l de cet élément. Les sulfates et les chlorures de magnésium sont très solubles, et l'eau en contact avec leurs gisements peut contenir plusieurs centaines de milligrammes de magnésium par litre (Becker et Durfor, 1972).

On remarque que les teneurs en magnésium varient entre 7 mg/l enregistrée au mois d'avril 2000, et 48 mg/l enregistrée en mai 2001. L'évolution de magnésium se fait en sens inverse avec le volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-15).

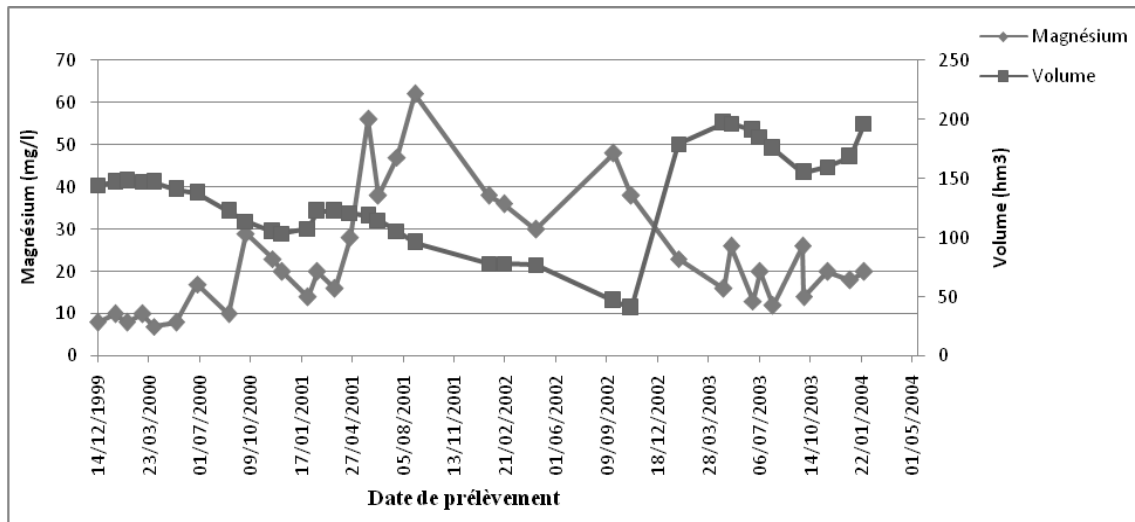


Figure V-15 : Evolution de la teneur du magnésium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.

V.4.2.1.3. Potassium (K^+)

C'est un élément alcalin, très réactif avec l'eau, on le retrouve dans les roches ignées et dans la nature sous forme de chlorure double dans de nombreux minerais. Il se trouve aussi dans la végétation sous forme de carbonate. Il est à peu près constant dans les eaux naturelles (10 à 15 mg/l) et n'a pas d'effet sur la santé de la population. Certains rejets industriels et d'usines d'engrais peuvent entraîner des quantités de potassium relativement importantes dans l'eau (Rodier, 1975 & Gafou, 2007).

On remarque que les teneurs en potassium varient entre 2 mg/l enregistrée en 2001, et 9 mg/l enregistrée en avril 2003. On constate que les teneurs en potassium sont faiblement influencées par la variation de volume d'eau de la retenue (Figure V-16).

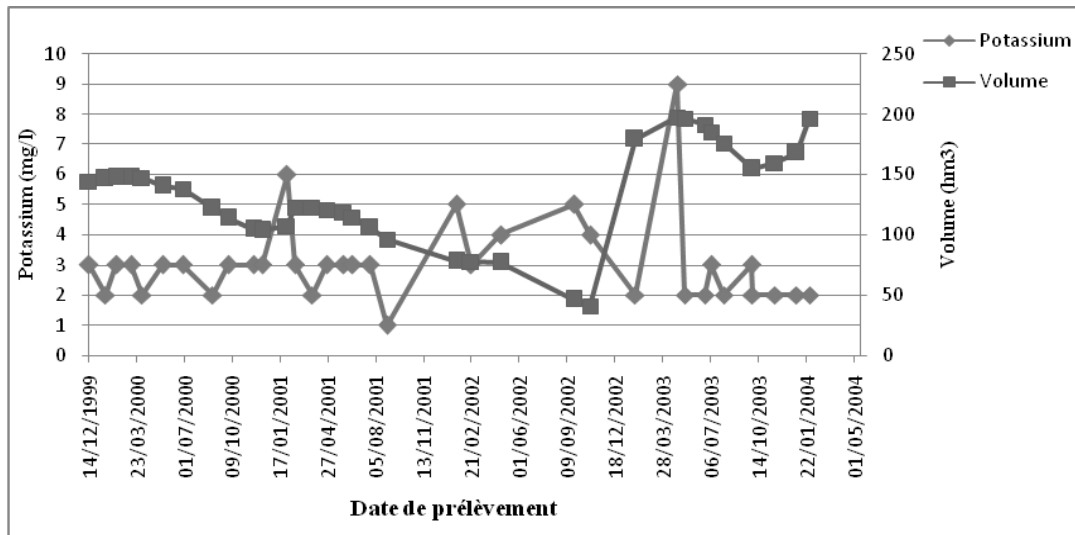


Figure V-16 : Evolution de la teneur du potassium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.

V.4.2.1.4. Sodium (Na⁺)

C'est un élément qui existe dans la totalité des eaux car la solubilité des ses sels est très élevée. En agriculture, le composé du sodium le plus important est le chlorure de sodium.

On remarque que les teneurs du sodium varient entre 12 mg/l enregistrée en avril 2003, et 68 mg/l enregistrée en septembre 2002. Le sodium évolue d'une manière inverse au volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-17).

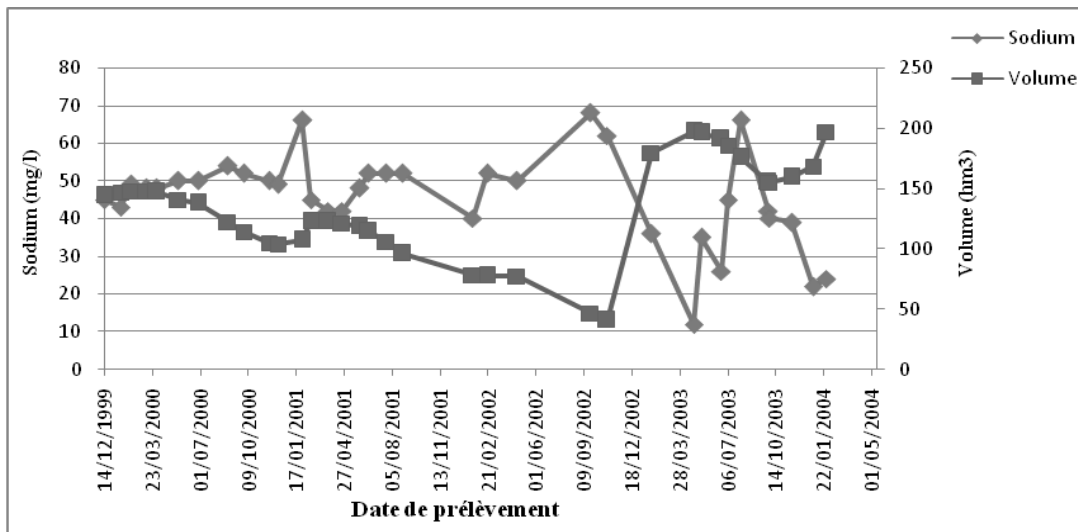


Figure V-17: Evolution de la teneur du sodium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

V.4.2.2. Les Anions

V.4.2.2.1. Chlorures (Cl^-)

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Ils ont une influence sur la faune et la flore aquatique ainsi que sur la croissance des végétaux (Makhoukh et al., 2011). Le chlorure existe dans toutes les eaux à des concentrations très variables. L'origine peut être naturelle, percolation à travers des terrains salés, ou anthropique, de l'activité humaine. Dans l'eau potable, la concentration maximale acceptable est de 250 mg/l. Si la teneur est supérieure à cette valeur, elle affecte le goût de l'eau. Une concentration élevée de (Cl^-) peut provoquer l'eczéma et l'érythème (Beaudry et Henry, 1984).

On remarque que les teneurs du chlorure varient entre 35 mg/l enregistrée en octobre 2003, et 90 mg/l enregistrée en décembre 1999 et en janvier 2001. Les chlorures évoluent inversement au volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-18).

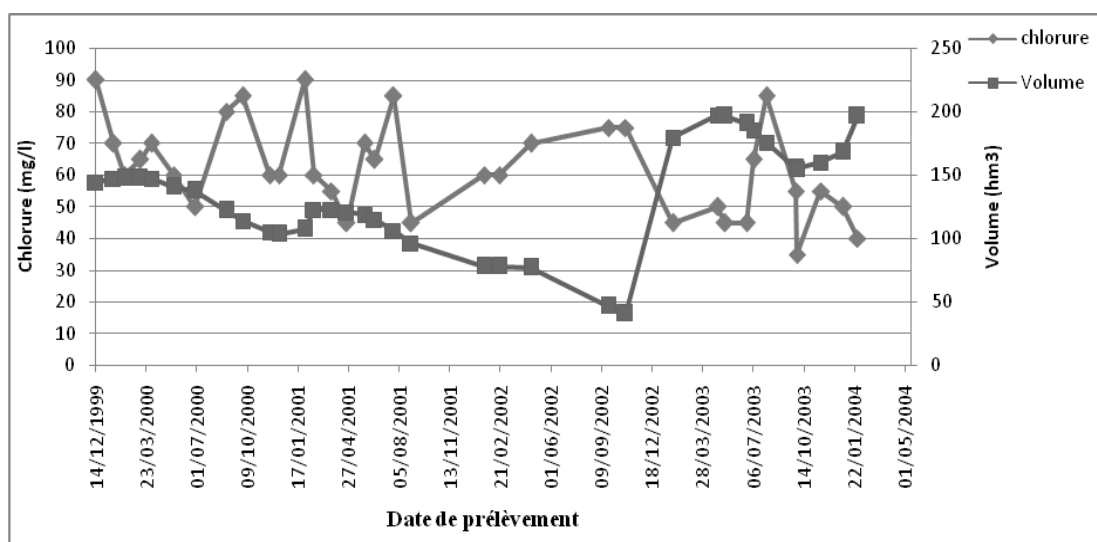


Figure V-18: Evolution de la teneur du chlorure en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

V.4.2.2.2. Bicarbonate (HCO_3^-)

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire, dolomie...) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO_2) (Belhadj, 2006).

Pendant la période d'étude on remarque que les teneurs en bicarbonate varient entre 183 mg/l enregistrée en juin et juillet 2001, et 122 mg/l comme valeur minimale. Les teneurs en bicarbonates évoluent inversement au volume d'eau de la retenue dans le temps. On constate que les eaux de la cuvette le long de la période d'étude sont moyennement chargées en cet élément (Figure V-19).

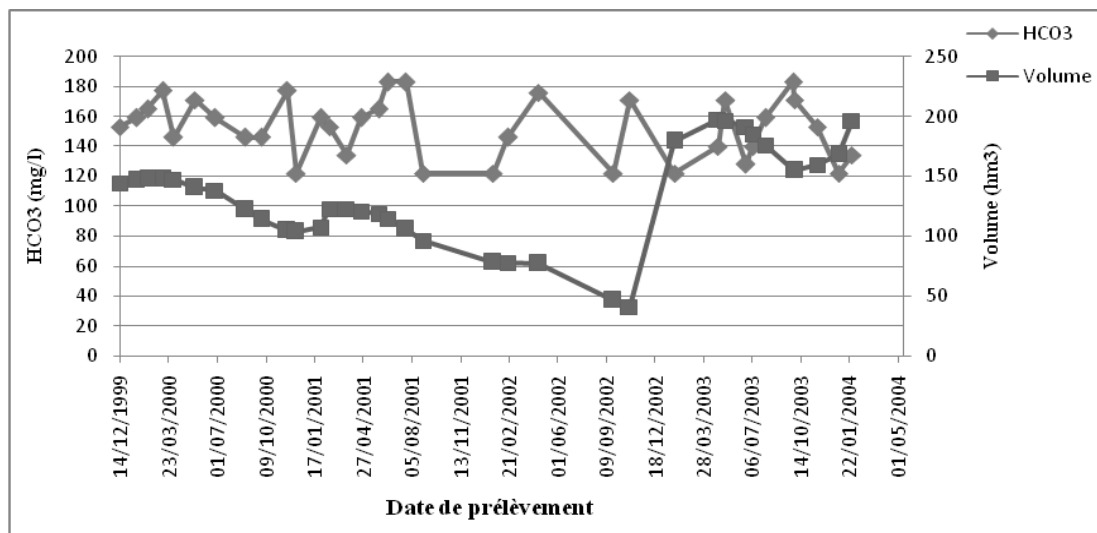


Figure V-19 : Evolution de la teneur du bicarbonate en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

V.4.2.2.3. Les sulfates (SO_4^{2-})

La concentration des sulfates est très faible, dans la plupart des eaux douces. Elle peut atteindre 30 à 50 mg/l dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de minéraux sulfatés. La teneur en sulfates dans l'eau est élevée dans les zones contenant du gypse. Pour une eau destinée à la consommation humaine, en raison du goût et de l'odeur, l'OMS en 2011, recommande comme valeur limite 250 mg/l. (Ahonon, 2011).

On remarque que la teneur en sulfates varie entre 50 mg/l enregistrée en avril 2003, et 220 mg/l enregistrée en janvier 2001. Les sulfates évoluent inversement proportionnelle au volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-20).

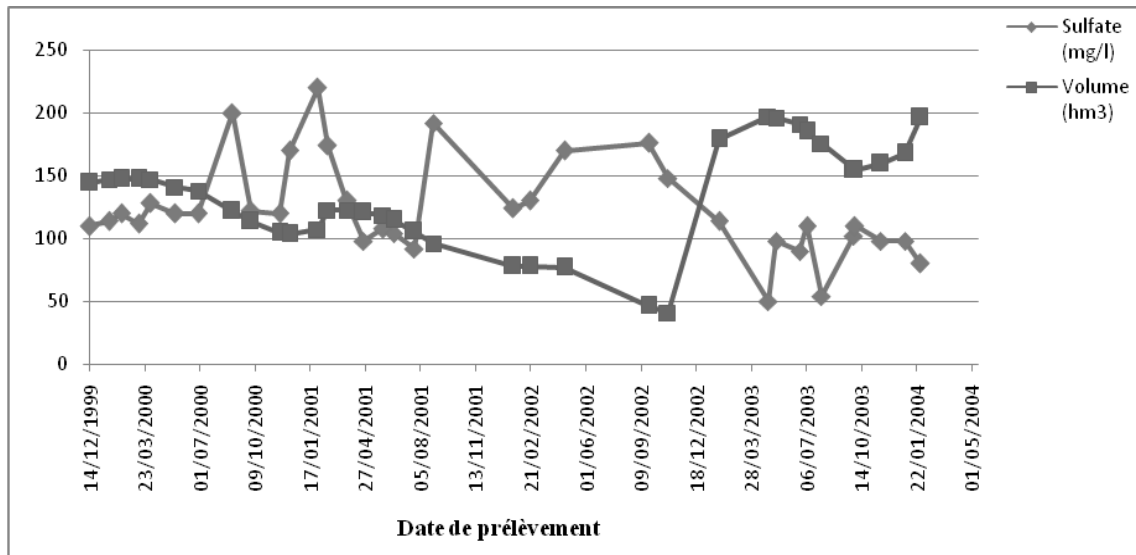
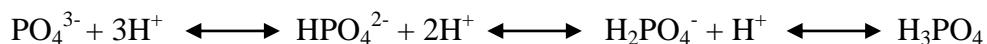


Figure V-20: Evolution de la teneur du sulfate en fonction du volume d'eau de la retenue.

IV.4.2.2.4. Les phosphates (PO_4^{3-})

Les phosphates font partie des anions facilement fixés par le sol, leur présence dans les eaux naturelles est liée à la nature des terrains traversés et à la décomposition de la matière organique (Beaudry et Henry, 1984). Le phosphore est un élément essentiel à la vie aquatique et les fortes concentrations en phosphates rencontrées dans l'estuaire témoignent d'un enrichissement d'origine domestique et agricole de l'activité industrielle. L'excès en phosphate entraîne l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques. Des teneurs supérieures à 0,5 mg/l doivent constituer un indice de pollution.

Les phosphates peuvent se trouver sous différentes formes oxydées, méta HPO_3 , pyro $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ et ortho H_3PO_4 . En milieu aqueux, les formes méta et pyro tendent vers la forme ortho pour des pH de 5 à 8. Les réactions chimiques entre les différentes formes de phosphate sont données par la réaction suivante (Beaudry et Henry, 1984):



On remarque que les teneurs en phosphates varient entre 0 mg/l et 1 mg/l. La valeur maximale a été enregistrée en janvier 2001. On constate que les teneurs en phosphates évoluent tantôt inversement au volume d'eau de la retenue tantôt en parallèle. (Figure V-21).

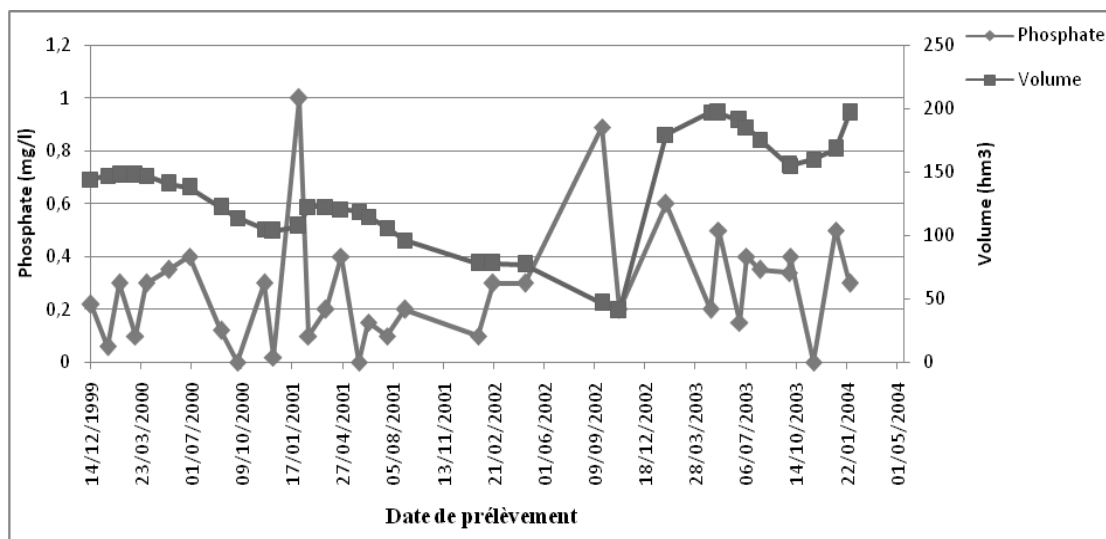


Figure V-21: Evolution de la teneur du phosphate en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

IV.4.2.3. Éléments indicateurs de pollution

Les eaux usées proviennent essentiellement de l'activité (humaine) domestique de tous les jours. L'analyse la plus fréquente des éléments indicateurs de pollution urbaine comprend les mesures de la DBO_5 , DCO, O_{2dis} , ainsi que les éléments azotés (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+).

Afin d'apprécier la qualité des eaux du barrage étudié, nous allons nous référer à la grille de la qualité globale des eaux (Tableau V-5).

Tableau V-5 : Grille de qualité globale.

Classe De Qualité	Unité	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
DBO_5	mg/l	< 3	3 à 5	5 à 10	10 à 25	> 25
DCO	mg/l	< 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80	> 80
O_{2dis}	mg/l	> 8	5 à 8	3 à 5	< 3	0
NO_3^-	mg/l	< 5	5 à 25	25 à 50	50 à 80	> 80
NO_2^-	mg/l	< 0,1	0,1 à 0,3	0,3 à 1	1 à 2	> 2
NH_4^+	mg/l	< 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8	> 8

V.4.2.3.1. Les éléments nutritifs

V.4.2.3.1.1. Les nitrates (NO_3^-)

Les ions nitrites et nitrates se rencontrent dans la nature où ils font partie du cycle de l'azote. L'ion (NO_3^-) est la forme la plus stable de l'azote dans les composés contenant du dioxygène ; bien que chimiquement inerte, il peut être réduit par certains micro-organismes. La présence de nitrates dans l'eau est un indice de pollution d'origine agricole (engrais), urbaine (dysfonctionnement des réseaux d'assainissement) ou industrielle (Ahonon, 2011). Dans les régions industrielles, la teneur en nitrates de l'eau de pluie peut atteindre 5 mg/l. Dans les régions rurales, les teneurs sont un peu plus faibles. Normalement la teneur en nitrates des eaux de surface est faible (0-18 mg/l). Cette teneur varie souvent avec la saison et peut augmenter lorsque les rivières sont alimentées par des aquifères riches en nitrates. La norme retenue pour les eaux potables par l'OMS est de 50 mg/l (OMS, 2011).

On remarque que la teneur maximale des nitrates est enregistrée en avril 2003 (28 mg/l), comme la valeur minimale (0 mg/l) est enregistrée en juin 2000. On constate que les teneurs en nitrates évoluent inversement au volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-22).

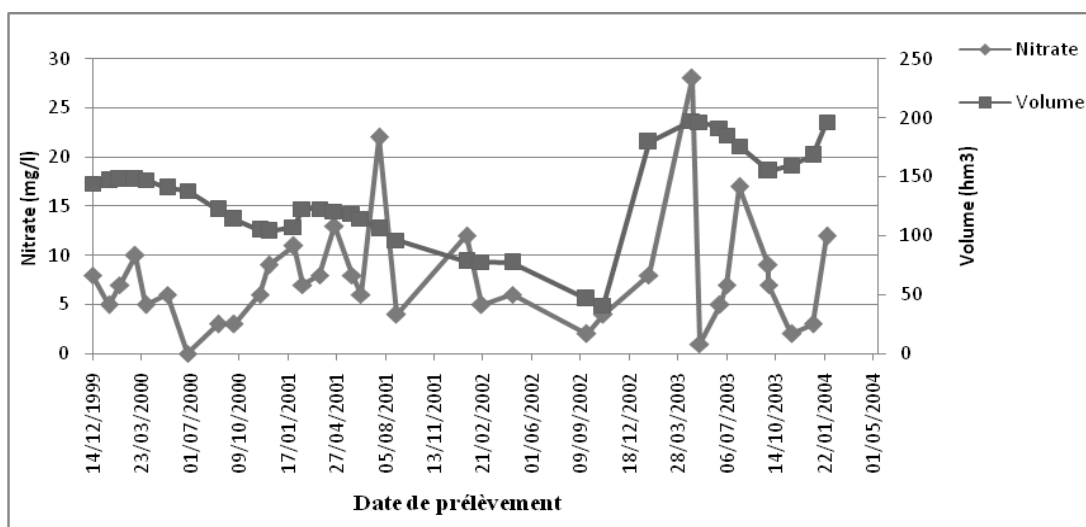


Figure V-22: Evolution de la teneur du nitrate en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

V.4.2.3.1.2. Les nitrites (NO₂⁻)

Sont les sels de l'acide nitreux. L'acide nitreux est un acide instable de formule (HNO₂). Dans les cours d'eau, notamment canalisés, et dans les régions densément habitées ou d'agriculture intensive, les nitrites sont souvent un paramètre important de déclassement des cours d'eau. Les valeurs du nitrite mesurées au niveau de la cuvette du barrage de Hammam Debagh varient entre (0 mg/l et 0.08 mg/l). On remarque que les teneurs en nitrites évoluent inversement au volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-23).

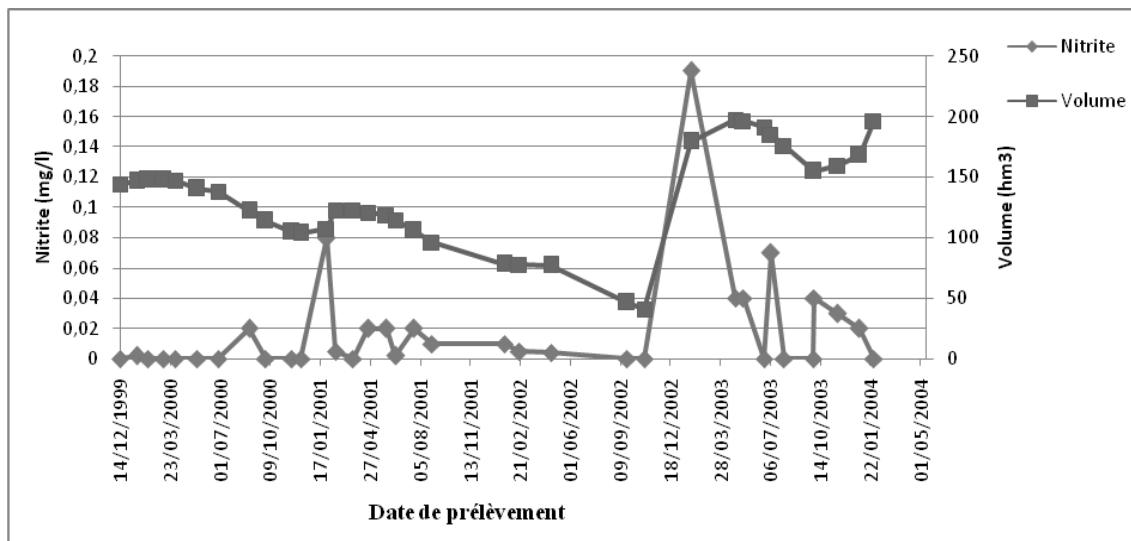


Figure V-23: Evolution de la teneur du nitrite en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

V.4.2.3.1.3. Ammonium NH₄⁺

L'azote ammoniacal constitue un des maillons du cycle complexe de l'azote dans son état primitif. C'est un gaz soluble dans l'eau. Il existe en faible proportion, inférieure à 0,1 mg/l d'azote ammoniacal dans les eaux naturelles. Il constitue un bon indicateur de la pollution des cours d'eau par les effluents urbains. Dans les eaux superficielles, il provient de la matière organique azotée et des échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère (Chapman et kimstach, 1996). Le transfert de la forme ammonium vers les nitrites et les nitrate se fait par oxydation. Cette réaction est rapide en présence de l'oxygène. La forte

teneur en CO₂ et la faible teneur en oxygène accroissent la concentration en ammonium dans l'eau (Belhadj, 2006).

On remarque que les valeurs d'ammonium mesurées au niveau de la cuvette du barrage varient entre (0 mg/l et 0.21 mg/l). On remarque que les teneurs en ammonium restent stables dans le temps, et sont faiblement influencées par la variation du volume d'eau de la retenue (Figure V-24).

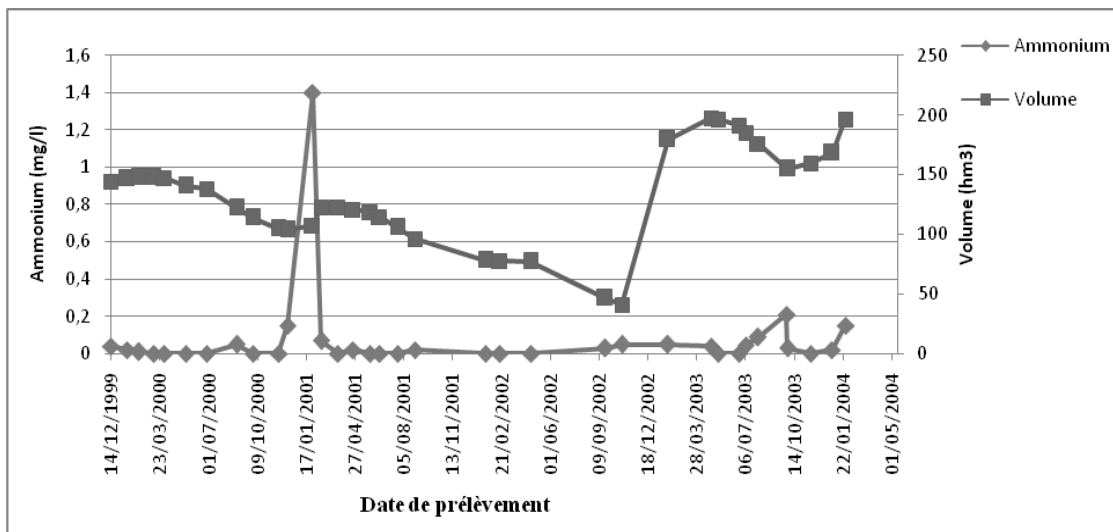


Figure V-24: Evolution de la teneur d'ammonium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

V.4.2.3.2. La demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La demande biochimique en oxygène est la quantité d'oxygène consommée dans des conditions d'essais spécifiques (incubation pendant 5 jours, à 20° dans l'obscurité) par les micro-organismes présents dans l'eau, pour assurer la dégradation de la matière organique par voie biologique. La DBO₅ représente plus particulièrement une mesure de la charge polluante d'origine carbonée (pollution organique biodégradable). Elle fournit donc une des indications importantes permettant de juger de la qualité d'une eau et de son degré de pollution. Par contre, c'est un test reconnu trop peu précis pour qualifier les eaux naturelles mais très utilisé pour surveiller l'efficacité des stations d'épuration.

Les valeurs de la DBO_5 mesurées pendant la période d'observation varient entre (0.5 mg/l et 5.5 mg/l). On remarque que la valeur maximale de la DBO_5 est enregistrée en août 2003 et la valeur minimale a été enregistrée en mars 2000. On remarque que Les concentrations de la DBO_5 évoluent d'une manière inverse avec le volume d'eau de la retenue pendant toute la période d'échantillonnage (Figure V-25).

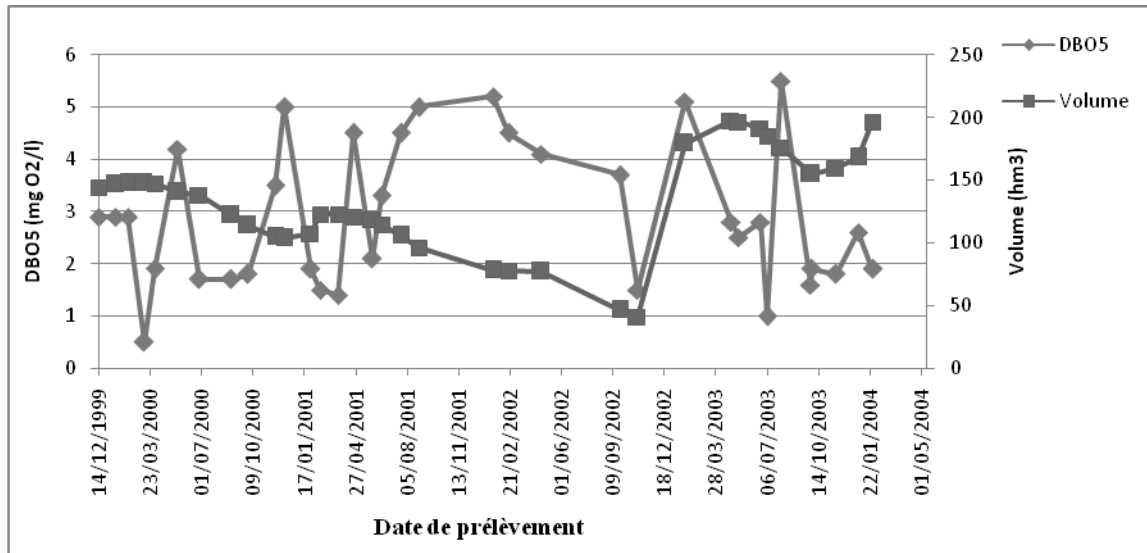


Figure V-25: Evolution de la DBO_5 en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

V.4.2.3.3. La demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO est la quantité d'oxygène consommée par la matière oxydable dans des conditions de l'essai. Contrairement à la DBO_5 où l'oxydation se fait lentement par l'activité des microorganismes, l'oxydation, pour la mesure de la DCO, est provoqué à l'aide d'un oxydant puissant (bichromate de potassium) en milieu acide fort (H_2SO_4). La DCO permet de mesurer la majeure partie de la matière organique biodégradable. Elle donne une image de la matière organique présente même si le développement de microorganismes est impossible (présence d'un toxique par exemple). C'est pourquoi les valeurs de DCO sont nécessairement supérieures aux valeurs de DBO_5 (Marcel, 1995).

Les valeurs de la DCO mesurées pendant la période d'observation varient entre (6 mg/l et 49 mg/l). On remarque que la valeur maximale de la DBO est enregistrée en décembre 2000, et la valeur minimale est enregistrée en février 2001. Les concentrations de la DCO évoluent d'une manière inverse avec le volume d'eau de la retenue pendant toute la période d'échantillonnage suite aux mêmes phénomènes de dilution et de concentration. (Figure V-26).

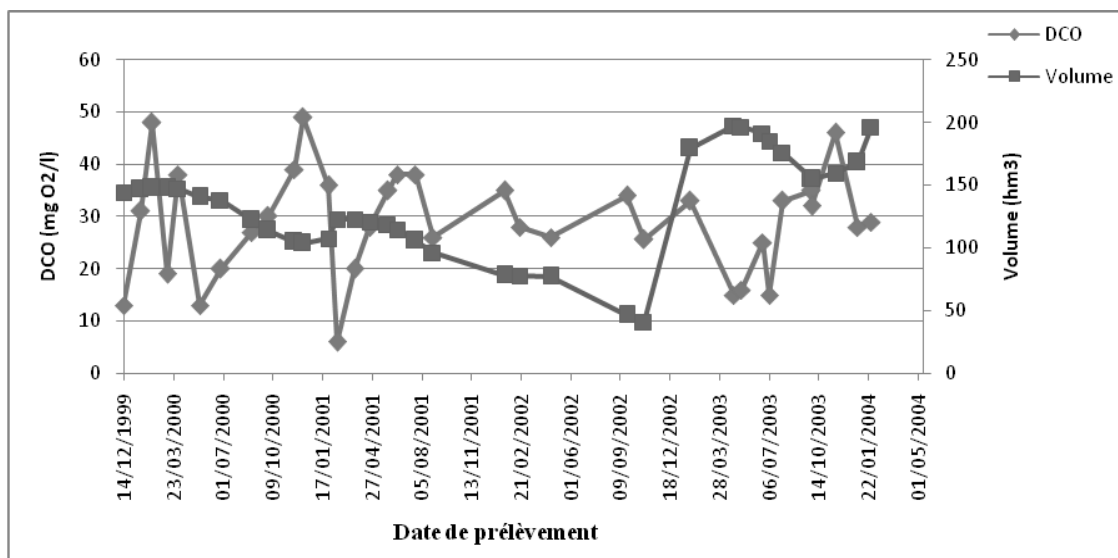


Figure V-26: Evolution de la DCO en fonction du volume d'eau de la retenue.

V.4.2.3.4. Le rapport DCO/DBO

La différence entre la DCO et la DBO est due aux substances qui ne peuvent pas être décomposées biologiquement. Le rapport entre la DBO et la DCO constitue une mesure indicative de la « dégradabilité » biochimique des composés présents dans l'eau.

Le rapport DCO/DBO_5 , permet donc d'apprécier la dégradabilité de la matière organique. (Jowett, 1980). Il est proche de 1.5 pour les eaux vannes, de 2 pour les eaux usées urbaines et varie entre 3 et 5 pour les effluents issus des stations d'épuration et des zones industrielles. L'élévation du rapport indique un accroissement de la matière organique non biodégradable.

Les résultats obtenus du rapport DCO/DBO₅ montre que toutes les valeurs sont supérieures à 3, ces valeurs importantes de ce rapport indiquent qu'une grande partie de la matière organique n'est pas biodégradable, ce qui traduit l'influence d'une pollution surtout industrielle. (Figure V-27)

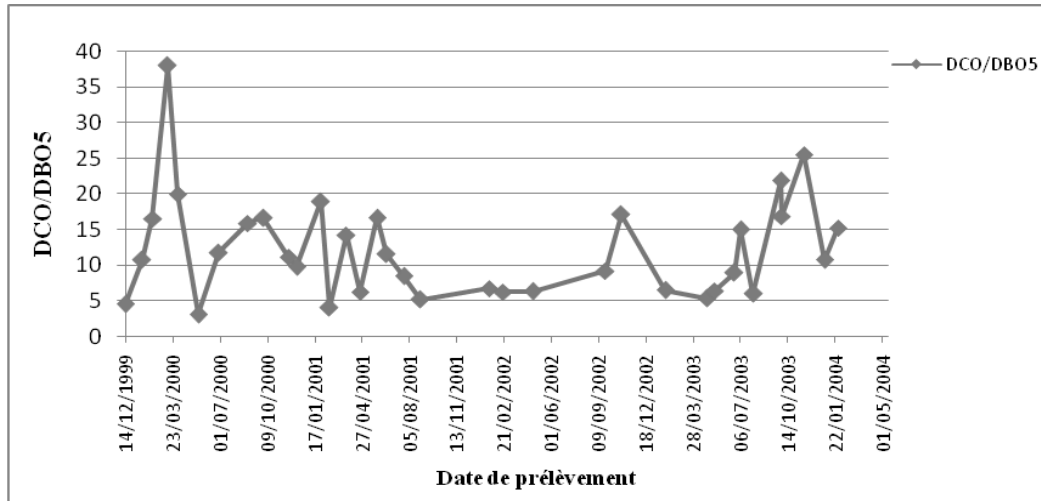


Figure V-27: Evolution de rapport DCO/DBO5 dans le temps.

V.4.2.3.5. L'oxygène dissous (O_{2dis})

La concentration en oxygène dissous constitue, avec les valeurs du pH, l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques (Beupoil et Bornene, 1997). L'oxygène est l'un des paramètres particulièrement utile pour l'eau et constitue un excellent indicateur de sa qualité. C'est un des paramètres les plus sensibles à la pollution. Sa valeur nous renseigne sur le degré de pollution et par conséquent sur le degré de l'auto-épuration d'un cours d'eau.

On remarque que les teneurs en oxygène au niveau de la cuvette du barrage de Hammam Debagh varient entre (63.2 mg/l et 100 mg/l). Les teneurs de l'oxygène dissous évoluent en parallèle avec le volume d'eau de la retenue (Figure V-28).

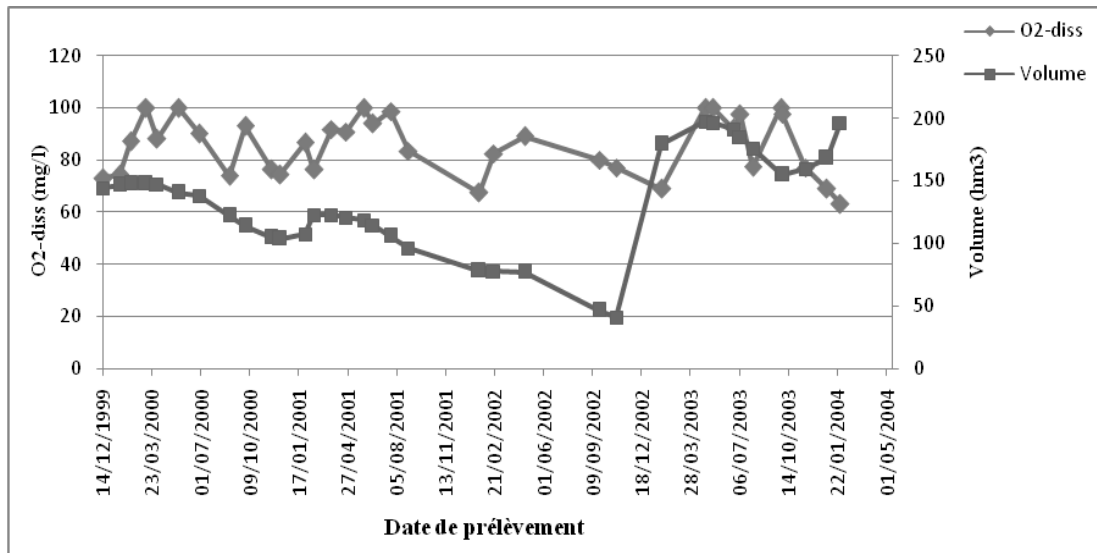


Figure V-28: Evolution de la teneur d'oxygène dissous en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps

IV.4.2.3.6. La matière en suspension (MES)

La matière en suspension comprend toutes la matière minérale ou organique solubles pas dans l'eau. Elles incluent les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres micro-organismes vivant dans l'eau. La quantité de matières en suspension varie notamment selon la saison, la pluviométrie, le régime d'écoulement des eaux, la nature des rejets, etc... Cette matière affecte la transparence de l'eau et diminue la pénétration de la lumière et, par suite, la photosynthèse. Elle peut également gêner la respiration des poissons. Par ailleurs, la matière en suspension peut accumuler des quantités élevées de matières toxiques (métaux, pesticides, huiles minérales, hydrocarbures aromatiques polycycliques...). (Makhouk et al., 2011). La matière en suspensions est exprimée en mg/l.

On remarque que la concentration en MES varient entre 40 mg/l et 260 mg/l. La valeur maximale a été enregistrée en septembre 2002. Les teneurs de la matière en suspension évoluent inversement proportionnelle au volume d'eau de la retenue dans le temps (Figure V-29).

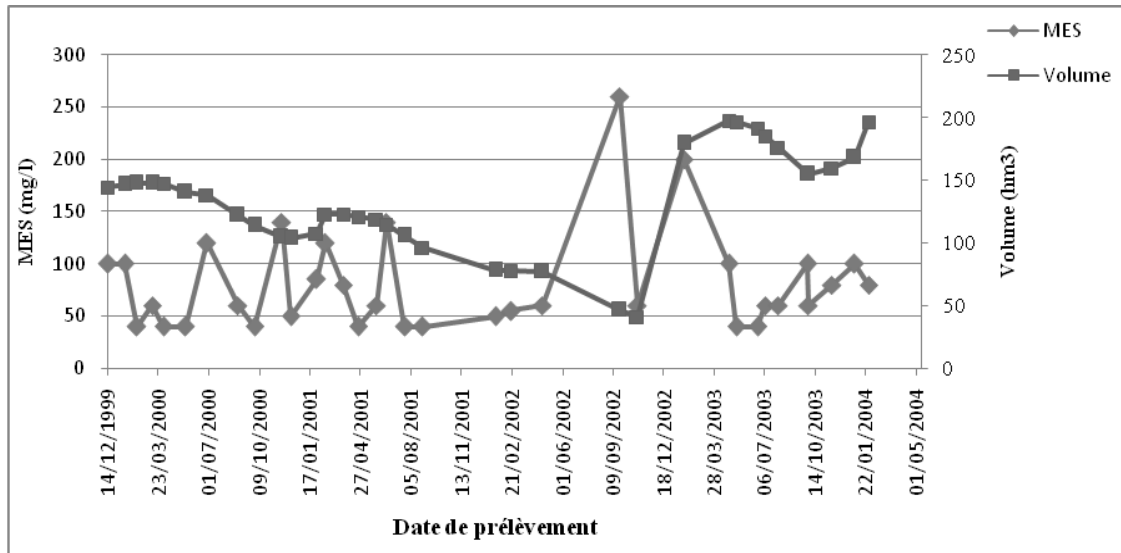


Figure V-29: Evolution des teneurs en MES en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.

V.5. Qualité des eaux

Le but essentiel du barrage de Hammam Debagh est l'alimentation en eau pour l'agriculture du périmètre Guelma-Boucheouf. (Benchaiba, 2006).

La diminution de la capacité des eaux souterraines de la wilaya de Guelma, les besoins augmentent avec l'accroissement démographique, donc il est important d'alimenter les populations en eau potable à l'aide des eaux du barrage de Hammam Debagh. Ceci nous oblige donc à examiner la potabilité de cette eau.

V.5.1. Normes de qualité

Les normes de qualité définissent les critères que peut avoir une eau destinée à un usage quelconque qu'il s'agit d'une eau industrielle, à la consommation humaine ou à l'irrigation. Citons brièvement les critères de qualité de l'eau potable

- Pour la **qualité organoleptique**, l'eau doit être agréable à boire, claire, fraîche et sans odeur. C'est principalement par ces aspects que le consommateur apprécie la qualité d'une eau. Ce sont les paramètres de confort.

- Pour la **qualité physico-chimique**, l'eau ne doit pas contenir d'éléments chimiques indésirables comme Fe ou Mn ou toxiques comme Pb ou Hg par exemple, qui entraîneraient des risques sanitaires à court, moyen et à long terme.

- Pour la **qualité bactériologique**, l'eau ne doit pas contenir de germes pathogènes (bactéries, virus, parasites...) qui provoqueraient des maladies chez les consommateurs. C'est la qualité la plus importante de la potabilité d'une eau.

Divers normes ont été établies. En Algérie, elles ont été fixées par le ministère du commerce par l'arrêté du 26 juillet 2000 publié dans le journal officiel de la République Algérienne N°51 du 20 août 2000. L'organisation mondiale pour la santé, dans sa dernière version (WHO, 2011) a publié des normes guides pour l'eau potable (Tableau V-6).

Afin de définir la potabilité des eaux superficielles du barrage de Hammam Debagh, nous nous sommes basés sur les normes Algérienne et celles de l'O.M.S qui ont défini la concentration maximale de substance. Les teneurs supérieures peuvent être dangereuses pour la santé. La comparaison de nos analyses aux normes de potabilités montre que tous les échantillons ne dépassent pas ces normes.

V.5.2. Qualité des eaux pour l'irrigation

La rareté des précipitations et la forte évaporation, ont contraint les agriculteurs à utiliser les eaux du barrage pour l'irrigation des terres agricoles. C'est pour cette raison que la qualité de l'eau utilisée dans l'agriculture doit présenter les meilleurs paramètres physicochimiques.

Il est connu que les sels minéraux contenus dans l'eau ont des effets sur le sol, les plantes et les êtres humains. Ces sels peuvent perturber le développement physique des plantes par l'absorption, qui agissent sur le processus osmotique, ou chimiquement par les réactions métaboliques telles que celles causées par les constituants toxiques. En plus, les sels causent des changements dans la structure du sol, sur sa perméabilité et sur son aération, affectant directement le développement de la plante. Par conséquent, la consommation de cette dernière peut être à l'origine de maladies chroniques.

Tableau V-6 : Norme Algérienne et de l'OMS des substances chimiques appliquées aux eaux de Hammam Debagh.

Paramètres	Normes OMS	Normes algériennes
Température (°c)	Max 25	/
potentiel d'Hydrogène (pH)	6.5 à 8.5	6.5 à 8.5
Conductivité électrique (µs/cm)	1500	2800 à 20°C
Calcium (Ca ⁺⁺) en mg/l	200	75 à 200
Magnésium (Mg ⁺⁺) en mg/l	150	150
Sodium (Na ⁺) en mg/l	200	200
Potassium (K ⁺) en mg/l	12	20
Chlorures (Cl ⁻) en mg/l	Max 250	200 à 500
Sulfate (SO ₄ ⁻) en mg/l	Max 250	200 à 400
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻) en mg/l	/	/
Nitrates (NO ₃ ⁻) en mg/l	Max 50	Max 50
Nitrites (NO ₂ ⁻) mg/l	Max 0.1	Max 0.1
Ammonium (NH ₄ ⁺) en mg/l	Max 0.5	Max 0.5
Phosphate (PO ₄ ⁻) en mg/l	Max 0.5	/
Oxygène dissous (O ₂ -dis) en mg d'O ₂ /l	5 ≤ O₂ ≤ 8	/
Résidu sec à 180°C mg/l d'oxygène	1500	1500-2000
MES (mg/l)	/	/
DBO ₅ en (mg O ₂ /l)	5	/
DCO en (mg O ₂ /l)	30	/

Pour mettre en évidence de phénomène nous allons utiliser trois méthodes qui sont :

- la Salinité CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
- la Classification de RICHARD ou RIVERSIDE (S.A.R)
- la Classification de WILLOX

V.5.2.1. La Salinité

Les sels dissous arrivent donc à la zone racinaire des plantes sur lesquelles l'action est directe soit sur l'évolution de la plante soit sur la production. La connaissance des concentrations de ces sels est importante pour la détermination des effets sur la récolte et sur les sols car la présence des sels dessous en forte concentration influe sur la qualité de l'eau qui engendre principalement des problèmes de salinité et de toxicité. Selon la conductivité électrique, l'eau peut être classée en trois catégories (Tableau V-7).

Tableau V-7 : Qualité de l'eau pour l'irrigation selon la conductivité électrique

Restriction pour la salinité	Salinité CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Valeurs des échantillons au niveau du barrage de Hammam Debagh			
		Année 2000	Année 2001	Année 2002	Année 2003
Aucune	<700	690	700	/	560
Légère à modéré	700-3000	/	/	720	/
Forte	> 3000	/	/	/	/
Eau du barrage		Aucune	Aucune	Légère à modéré	Aucune

On remarque que l'ensemble des échantillons de l'eau prélevés pendant les années 2000, 2001 et 2003, ne présentent aucune restriction pour la salinité et seule l'année 2002 présente une restriction légère à modérée. Donc l'eau du barrage ne présente aucun risque pour l'irrigation.

V.5.2.2. La classification de RICHARD ou RIVERSIDE (S.A.R)

Pour classer les eaux d'irrigation, on fait appel au diagramme de RICHARD (1954). Dans ce diagramme, les classes sont définies sur la base du taux d'absorption du sodium (S.A.R) « Sodium Absorption Ration », en fonction de la conductivité électrique. Si l'eau est très riche en sodium, celui-ci peut se fixer sur le complexe du sol et exercer alors une action défloculante. Pour apprécier le risque alcalin, on compare la concentration en ions Na^+ et celle en ions Ca^{++} et Mg^{++} à l'aide de l'équation V-2.

$$\text{S.A.R} = \text{Na}^+ / [\sqrt{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}/2}] \quad (\text{Equation V-2})$$

Avec :

Na^+ : concentration de l'eau en ions sodium en méq/l

Ca^{++} : concentration de l'eau en ions de calcium en méq/l

Mg^{++} : concentration de l'eau en ions magnésium en méq/l

Quatre classes de risque alcalin ont été définies en relation avec le risque salin.

S1 risque faible	—————→	$\text{S.A.R.} \leq 10$
S2 risque moyen	—————→	$10 \leq \text{S.A.R} \leq 18$
S3 risque élevé	—————→	$18 \leq \text{S.A.R} \leq 26$
S4 risque très élevé	—————→	$\text{S.A.R} > 26$

En tenant compte de la salinité globale des eaux, la conductivité électrique définie toujours quatre classes :

C1 risque faible	—————→	$\text{CE} \leq 250 \mu\text{S/cm}$
C2 risque moyen	—————→	$250 \mu\text{S/cm} < \text{CE} \leq 750 \mu\text{S/cm}$
C3 risque élevé	—————→	$750 \mu\text{S/cm} < \text{CE} \leq 2250 \mu\text{S/cm}$
C4 risque très élevé	—————→	$\text{CE} > 2250 \mu\text{S/cm}$

La combinaison de ces deux paramètres, permet d'avoir la classification suivante :

Classe C1-S1 ; Bonne qualité pour l'irrigation. Précautions avec les plantes sensibles

Classes C1-S2, C2-S1 ; Qualité moyenne à bonne. A utiliser avec précaution dans les sols mal drainés et pour les plantes sensibles (arbres fruitiers).

Classes C2-S2, C1-S3, C3-S1; Qualité moyenne à médiocre. A utiliser avec précaution. Nécessité de drainage avec dose de lessivage et/ou apport de gypse.

Classes C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1; Qualité médiocre à mauvaise. Exclure les plantes sensibles et les sols lourds. Utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers et bien drainés avec dose de lessivage et/ou apport de gypse.

Classes C2-S4, C4-S2, C3-S3; Qualité mauvaise. A n'utiliser avec beaucoup de précaution que dans les sols légers et bien drainés et pour des plantes résistantes. Risques élevés. Lessivage et apports de gypse indispensables.

Classes C3-S4, C4-S3 ; Qualité très mauvaise. A n'utiliser que dans des circonstances exceptionnelles.

Classe C4-S4 ; Déconseillée pour l'irrigation.

L'application de cette méthode aux eaux du barrage, montre qu'elles appartiennent aux classes (**C2-S1**) et (**C3-S1**). Figure V-30. Ces classes sont qualifiées de qualité moyenne à bonne à médiocre et que l'eau est à utiliser avec précaution dans les sols mal drainés et seulement pour l'irrigation de cultures tolérantes aux sels. Le drainage est nécessaire.

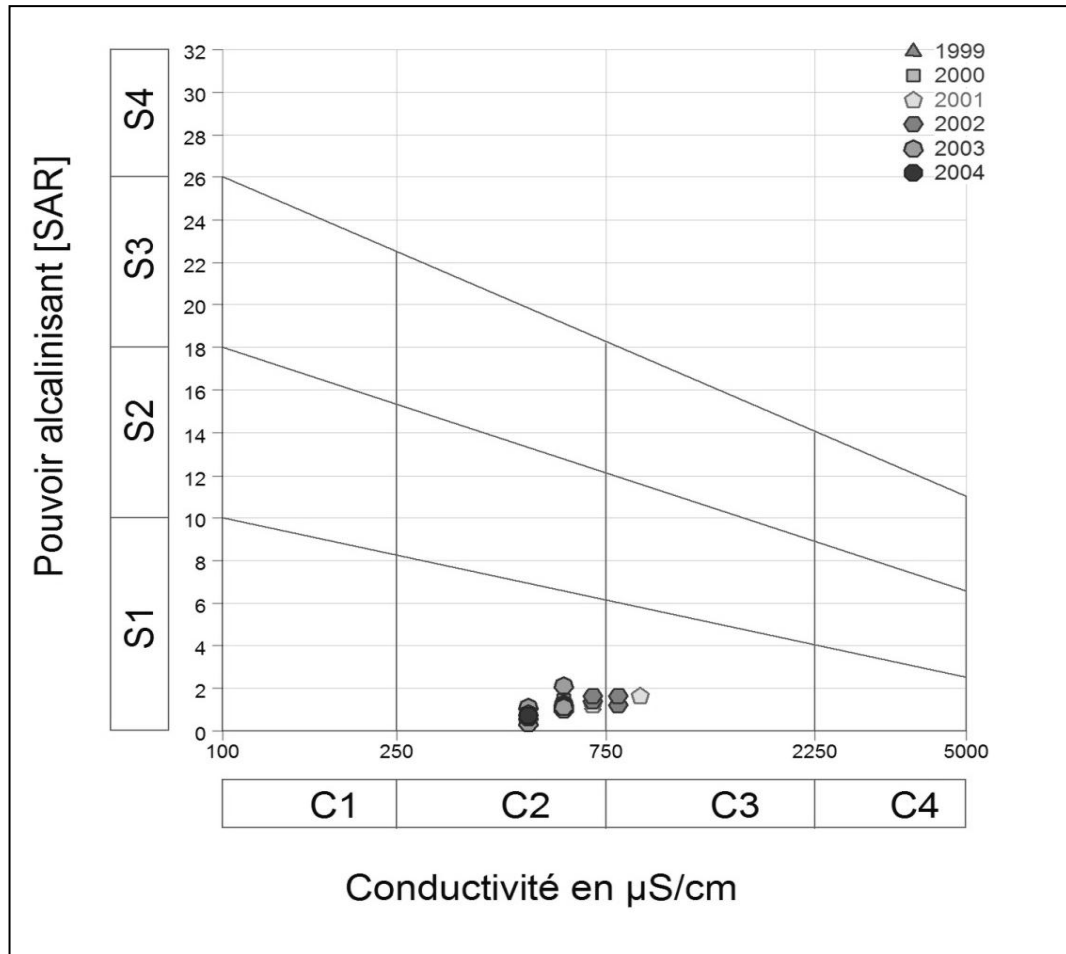


Figure V-30: Classification des eaux d'irrigation du barrage de Hammam Debagh selon la méthode de S.A.R.

V.5.2.3. La classification de WILCOX

Le diagramme de WILCOX (1948) est une représentation graphique du pourcentage du sodium (% Na) en fonction de la conductivité électrique, permettant de déterminer le risque de salinité des eaux. La classification définit cinq classes d'eau : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise (Figure V-31). L'augmentation de la charge en Na^+ influence négativement le développement des plantes. Cette classification est définie par l'équation V-3.

$$\% \text{Na}^+ = [\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)] * 100 \quad (\text{Equation V-3})$$

Le diagramme de WILCOX montre que la majorité des eaux sont de qualité bonne à excellente.

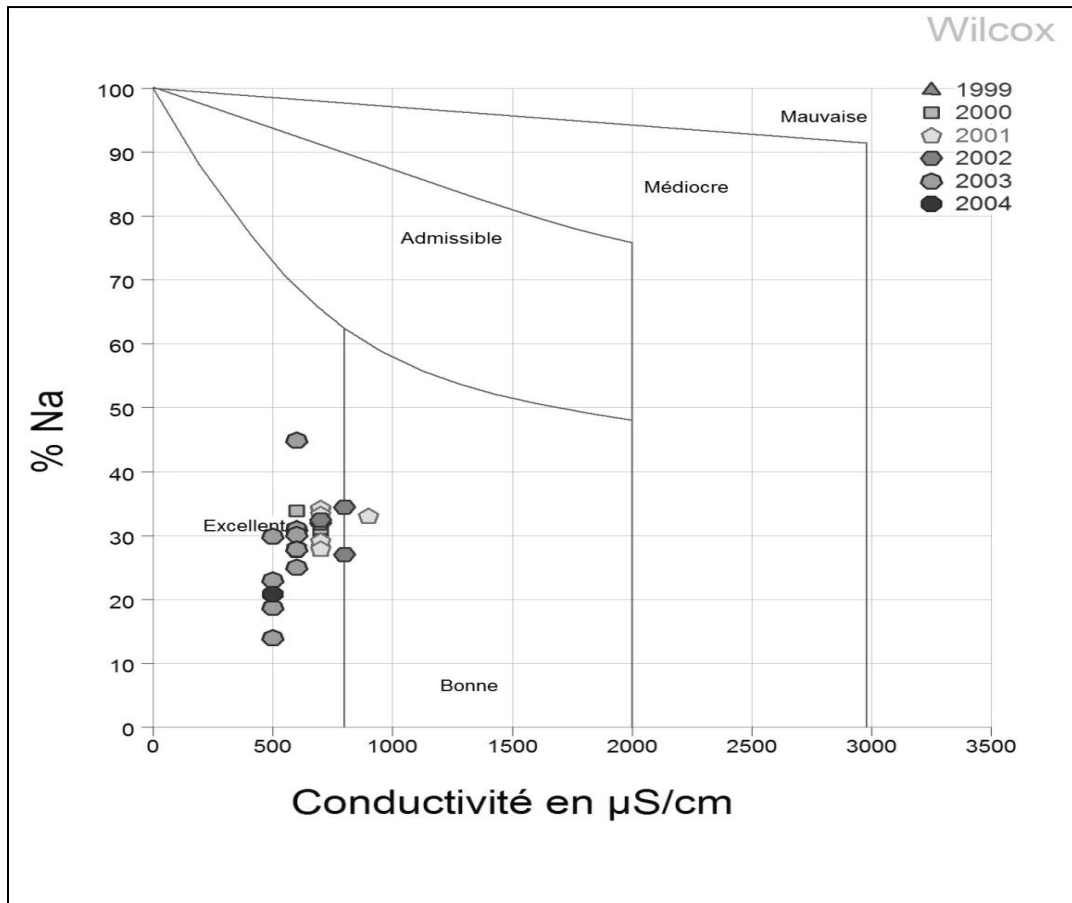


Figure V- 31: Classification des eaux d'irrigation du barrage de Hammam Debagh d'après la méthode de WILCOX

On constate donc que les trois méthodes semblent donner globalement les mêmes résultats et d'une manière générale, les eaux du barrage présentent des bonnes qualités pour leur utilisation en irrigation.

Conclusion

- L'interprétation des diagrammes de PIPER, SCHOELLER_BERKALOFF a montré que les eaux du barrage de Hammam Debagh sont caractérisées par une dominance des sulfates, du calcium et du magnésium avec parfois des bicarbonates qui semble être liée à la nature géologique et au déversement des eaux usées.

- L'analyse en composante principales a mis en évidence les liens significatifs entre les eaux fortement minéralisées riches surtout en Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} et HCO_3^- et les eaux faiblement minéralisées. L'étude a montrée aussi que le chimisme des eaux du barrage n'est pas lié seulement à la nature des terrains traversés, il peut être influencé par une pollution agricole et urbaine.

- L'étude de l'évolution des éléments physico-chimiques en fonction de temps montre que les eaux du barrage de Hammam Debagh contiennent une forte proportion de matière organique non dégradable. Les valeurs de la DCO, DBO_5 , du rapport DCO/DBO_5 , et de l'oxygène dissous, confirment cette hypothèse.

- La variation des éléments chimiques selon le volume de l'eau de la retenue montre que presque tous les éléments évoluent d'une manière inverse avec ce dernier suite à des phénomènes de dilution et de concentration.

- Les eaux du barrage présentent une potabilité permanente pour l'alimentation en eau potable et d'une manière générale sont des bonnes qualités pour l'irrigation.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'étude hydroclimatologique et hydrochimique du bassin versant de Oued Bouhamdene au barrage de Hammam Debagh situé au Nord-Est de l'Algérie, a été menée et elle nous a permis d'avoir un aperçu sur l'état quantitatif et qualitatif de la réserve en eau de la région. Ainsi, cette étude a permis de voir que :

- Le bassin versant de l'oued Bouhamdene est le siège de trois formations géologiques distinctes. La partie supérieure présente des formations tendres. La région centrale présente des formations perméables et de faible pente ce qui limite les possibilités d'écoulement de surface. Le bassin inférieur est constitué en majeure partie de roches résistantes mais à faible perméabilité favorisant le ruissellement.

- Le climat de la région est subhumide. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 585.56 mm pour une température moyenne annuelle de 18.72 °C. L'évolution annuelle de ces deux paramètres permet de distinguer une période fraîche et humide et une période chaude et sèche. L'analyse de la variation des précipitations en fonction de l'apport liquide et du volume d'eau de la retenue reflète un phénomène de transfert retardé de la pluie débit. L'évapotranspiration réelle moyenne est de l'ordre de 371 mm soit 63.36 % des précipitations moyennes annuelles. Le déficit agricole est de l'ordre de 611 mm pour la station de barrage de Hammam Debagh.

- Du point de vue hydrochimique, l'interprétation des différents diagrammes a montré que les eaux du barrage de Hammam Debagh sont caractérisées par une dominance des sulfates, du calcium, du magnésium et parfois des bicarbonates.

- L'analyse en composante principales a montré que le chimisme des eaux du barrage n'est pas lié seulement à la nature des terrains traversés, il peut être influencé par une pollution anthropique.

- La variation des éléments chimiques en fonction du volume d'eau de la retenue montre que presque tous les éléments évoluent d'une manière inverse avec ce dernier suite à des phénomènes de dilution et de concentration. Cette variation montre aussi que les eaux du barrage de Hammam Debagh contiennent une forte proportion de matière organique non dégradable.

- Les eaux du barrage présentent une potabilité permanente pour l'alimentation en eau potable et d'une manière générale, elles sont de bonnes qualités pour l'irrigation.



BIBLIOGRAPHIE

- Ahonon. A., 2011. Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface dans les zones montagneuses du sud-ouest du Togo : cas du canton de l'avie, mémoire master, Université de Lomé. 42 pp.
- Aiche, M., 1996. Contribution à l'étude de l'érosion en vue de l'aménagement du bassin versant de l'oued Bouhamdene, Mémoire de Magister, Université de Constantine, Institut de sciences de la terre.
- Annuaire hydrologique, 1993. Agence Nationale Des Ressources Hydraulique (ANRH). 260 pp.
- Athamna, A., 2008. Etude de l'évaluation du flux azote au niveau de la plaine de Seriana – Zana El Beïda, Mémoire de Magistère, Univ. Batna. 171 pp.
- Beaudry, T., 1984. Traitement des eaux, Ed. Le Griffon d'argile INC, Canada, 231 pp.
- Beaudry, T., Henry, T., M., 1984. Chimie des eaux, édition. Les griffons d'argiles, 1^{ère}, édition, INC Canada. 537 pp.
- Beauport, C., Bornens P., 1997. Oxygène dissous et toxicité de l'ammoniaque en zones estuariennes : seuils d'acceptabilité. Rapport de synthèse, Biotecmer – AELB, 49 pp.
- Becker, E., Durfor, C.J. 1972. Constituents and properties of water. Dans: Water quality in a stressed environment. W.A. Pettyjohn (dir. de publ.). Burgess Publishing Company.
- Belhadj, M.Z., 2006. Etude de la pollution du barrage de Zit-Emba Commune de Bekkouche Lakhdar Wilaya de Skikda, Mémoire de Magister, Univ. Batna. 107 pp.
- Benchaïba, L., 2006. Condition d'écoulement et impact sur la mobilisation des ressources en eau Bassin versant de l'oued Bouhamdene (W. DE GUELMA, EST ALGERIEN), Mémoire de Magister, Univ. Batna. 213 pp.
- Benahmed L., 2012. Développement d'une nouvelle relation ajustée de Turc pour l'évaluation de l'évapotranspiration de référence dans la zone humide de l'Algérie, Mémoire de Magister, Univ. Batna. 159 p.
- Briefrt, C., Perraud, R., 1990. Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. 2^{ème} édition française. De Boeck. 291pp.
- Boeglin, J.C., 2001. Propriétés des eaux naturelles. Technique de l'ingénieur, traité environnement, (G1110).

- Bouguerne, A., 2001. Etude comparative par analyse hydrologique et hydrochimique des eaux de surface des bassins versants de oued Boussalem et oued Rhumel, Mémoire de Magister, Univ. Batna. 148 pp.
- Carte géologique de Constantine (1960) Echelle 1 :200000. Ministère de l'énergie. Algérie
- Carte topographique de Philippeville (1960) Echelle 1:200000. Institut national de cartographie. Ministère de la défense nationale. Algérie
- Carte topographique de Hammam Meskoutine (1960) Echelle 1:200000. Institut national de cartographie. Ministère de la défense nationale. Algérie
- Chapman, D., Kimstach V., 1996. Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E and FN Spon, London, 126 pp.
- Chouabbi, A., 1987. Etude géologique de la région de Hammam N'baïls (S.E de Guelma, Constantinois), un secteur des zones extrêmes des magrébides. Thèse de 3^{ème} cycle, université de Toulouse.
- Dagnélie, P., 2006. Statistique théorique et appliquée. Tome 2 : Inférences à une et à deux dimensions. Bruxelles-université DE BOECK et LARCIER.
- Degremont, 1989. Mémento technique de l'eau, Technique et documentation, tome 1, 524 pp.
- Degremont, 2005. Mémento technique de l'eau, Lavoisier SAS -Lexique technique de l'eau, Paris, 2^{ème} édition.
- Djabri, L., 1996. Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse, origine géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de doctorat d'état, université d'Annaba, Algérie.
- Gafou, G., 2007. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des quartiers périphériques non-assainis de la ville de Lomé : cas de Zogbédji. Mémoire d'Ingénieur en Microbiologie alimentaire, ESTBA/UL : 434/08, 51 p.
- George, C. Harrap & Co., 1963. Day, E.H. The chemical elements in nature. London, U.K.
- Gril, J.J., Dorioz, J.M., 2004. Des bassins versants de recherches aux bassins opérationnels: quels bassins versants pour connaître et maîtriser les pollutions diffuses, ingénierie, 843 pp.
- Hakmi, A., 2006. Traitement de l'eau de la source Bousfer Oran .Mémoire de Licence . Université des sciences et de la technologie Oran.

- Hallaire, M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol. Vég.*2, pp.119-130.
- Journal Officiel De La République Algérienne Démocratique Et Populaire (JO n° 51/00). (2000). Arrêté du 26 juillet 2000 relatif aux caractéristiques de qualité d'une eau minérale naturelle et d'une eau de source. 4 p.
- Jowett, J. R., 1980. Clean lakes program guidance manual. United States Environmental Protection Agency. Washigton D.C. 20460. EPA-440/5-81-003.
- Kaiser, H. F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educ. Psychol.Meas.* 151 pp.
- Kemoukh, S., 2007. Dégradation de la qualité des eaux du barrage de zerdezas suite à une pollution naturelle w.de Skikda, mémoire de magister, Univ. Batna. 117 pp.
- Kempe, S., 1982. Long-term records of the C07 pressure fluctuations in fresh water. *Miditerreen Geololy Palaontology Institut*, 52, 91-332.
- Laborde, J.P., 1997. ‘ ‘ Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles de l'Algérie du Nord et ses documents annexes’’. Agence nationales des ressources hydrauliques. ANRH –Algérie.
- Lahondere, J.C., 1987. Les séries ultr-telliennes de l'Algérie Nord-Orientale et les formations Environnantes dans leurs cadres structuraux, Thèse doctorat d'état, Université de Toulouse.
- Lounnas, A., 2008. Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station hamadi-kroma de skikda, Algérie, mémoire de magister. Univ. du 20 Août 1955 Skikda. 120 pp.
- Makhoukh, M., Sbaa, M., Berrahou, A., Van, M., 2011. Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). *larhyss journal*, 9, 149-169.
- Malenfant, G., Nadeau, A., Laferriere, M., Minville J.J., 1995. La contamination par les nitrates : Prévention des risques à la santé. Unité de santé publique, Centre hospitalier régional du Grand-Portage, CLSC Rivières et marées, 38 p.
- Marcel, D., 1995. Chimie des oxydants et traitement des eaux. L'université de Poitiers (E.S.I.P), 230 pp.

- Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau. 2010. Analyses physico-chimiques, nutriments. Publié par l'Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. 46 pp.
- Ministère de l'Environnement de l'Ontario, 1976. Hazardous substances list and handbook. Rapport no ARB-TDA-33-76, Hazardous Substances Program, Air Resources Branch.
- Mizi, A., 2006. Traitement des eaux de rejets d'une raffinerie des corps gras région de Bejaia et valorisation de déchets oléicoles. Thèse de doctorat d'état, université d'Annaba, Algérie, 227 pp.
- OMS. 2006. Les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable. www.lenntech.fr 17/02/11.
- Philippo, P., Pommery, J. et Thomas, P., 1981. Evolution d'une eau de surface au cours des traitements de potabilisation ; comportements des espèces métalliques au contact des matières humiques. *Journal français d'hydrologie*. 12,1,7-27.
- Potelon, J.L., Zyman K., 1998. Le guide des analyses d'eau potable. Edition, La Lettre du Cadre Territorial, Voiron, France.
- Reinberg, A., 1971. Le sodium et la vie, 2^{ème} édition, PUF, Paris. 128 pp.
- Richards, L. A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agric. Handbook* 60, USDA, Washington D.C, 160 p.
- Roche M. 1963. Hydrologie de surface. Gauthier-Villars, Paris, 430 p.
- Rodier, J., 1975. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Coll. Dunod Technique, Tome 2. Paris, 1365 pp.
- Ronalad, V., 2005. Eau, Environnement et Santé Publique, 2^{ème} édition, Ed TEC & DOC, X PARIS.
- Seghiri, R., 1996. Elimination des substances humiques extraites de l'eau de la retenue de Hammam-Ghrouz par coagulation-floculation avec le fer ferrique et les sels d'aluminium, mémoire de magister, Univ. de Constantine.
- Serra, L., 1954. Le contrôle hydrologique d'un bassin versant, *La Houille Blanche* (3^{èmes} Journées de l'hydraulique, SHF), Paris, pp.29-35.
- Stumm, W., Morgan J.J., 1981. *Aquatic Chemistry* 2nd Edition, John Wiley & Sons Ed. New York, 515 pp.

- Tessier, L., 2003. Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la seine : identification de signatures naturelles et anthropiques. Thèse doctorat, Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées. 262 pp.
- Thornthwaite, C.W., 1948."An Approach Toward a Rational Classification of Climate", *Geographical Review*. Vol 38. pp.55-94.
- Trajkovic S., 2009. " Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations under Humid Conditions" *Water Resour Manage* (2009) 23:3057–3067; Springer Science + Business Media B.V.
- Trajkovic, S., Kolakovic, S., 2009. "Wind-adjusted Turc equation for estimating reference evapotranspiration at humid European locations". *Hydrology research*, 40 (1), 45-52
- Vila, J.M., 1980. La chaine alpine de l'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Volume II. Thèse doctorat, Université. Pierre et Marie Curie. Paris.
- Wilcox, L.V., 1948. The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture Tech. Bull. 1962, Washington D.C.
- World Health Organization (WHO) 2011. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva. 564 p.
- Ziani, d., 2009. Impact de la pollution agricole et urbaine sur la qualite des eaux souterraines de l'aquifère de Ain Djasser. Est ALGERIEN, Mémoire magistère .Univ. de Batna. 156 pp.

Table Des Matières

Introduction Générale	2
CHAPITRE I : SYNTHESE BOBLOGRAPHIQUE	
Introduction	5
I. Les paramètres physico-chimiques de l'eau.....	5
I.1. Les paramètres physiques	5
I.1.1. La température (T).....	5
I.1.2. Conductivité électrique (CE).....	6
I.1.3. Le potentiel d'hydrogène (pH)	6
I.2. Principaux éléments présents dans l'eau.....	6
I.2.1. Cations majeurs.....	6
I.2.1.1. Calcium (Ca ⁺⁺).....	6
I.2.1.2. Magnésium (Mg ⁺⁺).....	6
I.2.1.3. Sodium et potassium (Na ⁺ et K ⁺).....	7
I.2.2. Anions majeurs	8
I.2.2.1. Chlorures (Cl ⁻)	8
I.2.2.2. Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	8
I.2.2.3. Les sulfates (SO ₄ ⁻).....	9
I.2.2.4. Les phosphates (PO ₄ ³⁻).....	9
I.2.3. Éléments indicateurs de pollution.....	9
I.2.3.1. Les éléments nutritifs	10
I.2.3.1.1. Les nitrates (NO ₃ ⁻)	10
I.2.3.1.2. Les nitrites (NO ₂ ⁻)	10
I.2.3.1.3. Ammonium (NH ₄ ⁺)	10
I.2.3.2. L'oxygène dissous (O ₂)	11
I.2.3.3. La demande biochimique en oxygène (DBO ₅)	12
I.2.3.4. La demande chimique en oxygène (DCO)	12
I.2.3.5. La matière en suspension (MES)	13
I.2.3.6. Le résidu sec (RS)	13
I.3. Pollution des eaux	14
I.3.1. Origine de la pollution	14
I.3.1.1. L'industrie	14
I.3.1.2. L'agriculture	14
I.3.1.3. Pollution domestique	14
I.3.1.4. Pollution par les eaux pluviales	15
I.3.1.5. Pollution d'origine naturelle	15
I.3.1.6. Pollution par les substances associées au traitement de l'eau	15

I.3.2. Les principaux polluants des eaux naturelles	15
I.3.2.1. Polluants physiques	15
I.3.2.1.1. Les éléments grossiers	16
I.3.2.1.2. Les sables	16
I.3.2.1.3. La matière en suspension (MES)	17
I.3.2.2. Polluants chimiques	17
I.3.2.2.1. Les éléments chimiques minéraux	18
I.3.2.2.2. La matière organique	19
I.3.2.3. Polluants microbiologiques	19
Conclusion	

CHAPITRE II : GEOLOGIE

Introduction	21
II.1. La Situation Géographique	21
II.2. Le cadre géologique et lithologique.....	21
II.2.1. Les formations lithologiques	21
II.2.1.1. Les roches résistantes	24
II.2.1.2. Les roches moyennement résistantes	24
II.2.1.3. Les roches tendres.....	24
II.2.2. Le cadre structural actuel	24
II.2.2.1. Les formations peu ou pas tectonisées	24
II.2.2.1.1. Le Quaternaire	25
II.2.2.1.2. Le Mio- Pliocène continentale	25
II.2.2.2. Nappe numidienne	25
II.2.2.3. La nappe tellienne	25
II.2.2.4. La nappe néritique Constantinoise	26
II.2.2.5. Les unités ultra- telliennes	27
II.2.2.6. La série de Aïn El Kerma	28
II.2.3. Les mouvements tectoniques	28
II.2.3.1. La phase éocène	31
II.2.3.2. La période comprise entre la phase éocène et la phase de l'éocène inférieur.....	31
II.2.3.3. La phase miocène.....	31
II.2.3.4. La néotectonique.....	31
II.2.3.5. Les formations pas ou peu tectonisées	31
II.2.4. La perméabilité	34
Conclusion	

CHAPITRE III : GEOMORPHOLOGIE

Introduction.....	36
III.1. Délimitation du bassin versant	36
III.2. Le milieu physique	38
III.2.1. La montagne.....	38

III.2.2. Les collines	38
III.2.3. Les piedmonts	38
III.2.4. Les vallées alluviales	38
III.2.5. Le couvert végétal.....	38
III.2.6. Le réseau hydrographique	39
III.2.6.1. Présentation	39
III.2.7. Caractéristiques morphométriques du réseau hydrographique du bassin de Oued Bouhamdene	42
III.2.7.1. Profil en long.....	42
III.2.7.2. Paramètres morphométriques	42
Conclusion.....	45

CHAPITRE IV : HYDROCLIMATOLOGIE

Introduction.....	47
IV.1. Les données climatiques disponibles	47
IV.2. Caractérisation hydroclimatologique du bassin versant de l'Oued Bouhamdene.....	48
IV.2.1. Climatologie.....	48
IV.2.1.1. Le Climat.....	48
IV.2.1.2. Evolution dans le temps étalé sur la période disponible (1995-2005)	50
IV.2.1.2.1. Evolution annuelle des précipitations, des températures et d'évaporation	50
IV.2.1.2.1.1. Evolution annuelle des précipitations.....	50
IV.2.1.2.1.2. Evolution annuelle des températures	51
IV.2.1.2.1.3. Evolution annuelle de l'évaporation.....	52
IV.2.1.2.2. Evolution mensuelle des précipitations, des températures et d'évaporation.....	52
IV.2.1.2.2.1. Evolution mensuelle des précipitations.....	52
IV.2.1.2.2.2. Evolution mensuelle des températures.....	53
IV.2.1.2.2.3. Evolution mensuelle de l'évaporation.....	54
IV.2.2. Hydrométrie.....	54
IV.2.2.1. Evolution dans le temps (1995-2005).....	54
IV.2.2.1.1. Evolution annuelle des apports liquides.....	54
IV.2.2.1.2. Evolution mensuelle des apports liquides.....	55
IV.3. La variation du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations dans temps.	55
IV.3.1. La variation annuelle du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations.	55
IV.3.2. La variation mensuelle du volume d'eau de la retenue en fonction des précipitations	56
IV.4. Bilans hydrologique	57
IV.4.1. Estimation des paramètres du bilan hydrologique	57
IV.4.1.1. Evapotranspiration potentielle ETP	57
IV.4.1.1.1. Formule de THORNTHWAITE	57
IV.4.1.1.2. Formule de TURC	58
IV.4.1.1.3. Comparaison des deux formules antécédentes	59

IV.4.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR), ou déficit d'écoulement	60
IV.4.1.2.1. Formule de COUTAGNE	60
IV.4.1.2.2. Formule de TURC	61
IV.4.3. Application	61
IV.4.3.1. Bilan hydrologique de THORNTHWAITE	61
IV.4.4. Estimation du bilan d'eau.....	64
IV.4.4.1. Les différentes composantes du bilan	64
IV.4.4.1.1. Le ruissellement	64
IV.4.4.1.2. Estimation de la lame d'eau infiltrée	65
Conclusion	66

CHAPITRE V : HYDROCHIMIE

Introduction.....	68
V.1. Caractérisation des eaux du barrage	69
V.2. Les faciès chimiques	69
V.2.1. Faciès chimique selon PIPER	71
V.2.2. Faciès chimique selon SCHOELLER –BERKALOFF.....	72
V.3. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	75
V.3.1. Principe de l'ACP.....	75
V.3.2. Conditions d'utilisation de l'ACP	75
V.3.3. Application de l'A.C.P aux données chimiques des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh.....	76
V.3.3.1. Matrice de corrélation.....	76
V.3.3.2. L'analyse des plans factoriels	78
V.4. Evolution de la teneur des éléments physico-chimiques.....	81
V.4.1. Les paramètres physiques.....	81
V.4.1.1. La température (T °C).....	81
V.4.1.2. Potentiel d'hydrogène (pH).....	82
V.4.1.3. Conductivité électrique (CE) et du résidu sec (Rs).....	83
V.4.2. Les Eléments chimiques.....	85
V.4.2.1. Les cations.....	85
V.4.2.1.1. Le calcium (Ca ⁺⁺).....	85
V.4.2.1.2. Magnésium (Mg ⁺⁺).....	86
V.4.2.1.3. Potassium (K ⁺).....	87
V.4.2.1.4. Sodium (Na ⁺)	88
V.4.2.2. Les Anions.....	89
V.4.2.2.1. Chlorures (Cl ⁻).....	89
V.4.2.2.2. Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	90
V.4.2.2.3. Les sulfates (SO ₄ ⁻).....	90
V.4.2.2.4. Les phosphates (PO ₄ ³⁻).....	91
V.4.2.3. Éléments indicateurs de pollution.....	92

V.4.2.3.1. Les éléments nutritifs.....	93
V.4.2.3.1.1. Les nitrates (NO ₃ ⁻).....	93
V.4.2.3.1.2. Les nitrites (NO ₂ ⁻).....	94
V.4.2.3.1.3. Ammonium NH ₄ ⁺	94
V.4.2.3.2. La demande biochimique en oxygène (DBO5)	95
V.4.2.3.3. La demande chimique en oxygène (DCO).....	96
V.4.2.3.4. Le rapport DCO/DBO.....	97
V.4.2.3.5. L'oxygène dissous (O2).....	98
V.4.2.3.6. La matière en suspension (MES).....	99
V.5. Qualité des eaux	100
V.5.1. Normes de qualité.....	100
V.5.2. Qualité des eaux pour l'irrigation.....	101
V.5.2.1. La Salinité.....	103
V.5.2.2. La classification de RICHARD ou RIVERSIDE (S.A.R).....	104
V.5.2.3. La classification de WILCOX.....	106
Conclusion.....	108
Conclusion Générale	110
Références Bibliographiques	112

Liste des Figures

Figure 1 : Etats dispersés- états dissous. D’après (Marcel, 1995).....	16
Figure II-1 : Localisation géographique du bassin versant de Oued Bouhamdene (Bassin de la Seybouse).....	22
Figure II-2: Lithologie du bassin versant de Oued Bouhamdene.....	23
Figure II-3 a: Géologie du bassin versant de l’oued Bouhamdene.....	29
Figure II-3 b: Formation peu ou pas tectonisées quaternaire.....	30
Figure II-4: Perméabilité du bassin versant de l’oued Bouhamdene.....	33
Figure III-1: Délimitation du bassin versant du Barrage de Hammam Debagh.....	37
Figure III-2: Couverture végétale du bassin versant de l’oued Bouhamdene.....	40
Figure III-3: Réseau hydrographique du bassin versant de l’oued Bouhamdene.....	41
Figure III-4: Profil en long de l’oued Bouhamdene et de ses principaux affluents.....	43
Figure IV-1: Diagramme Ombrothermique.....	50
Figure IV-2: Evolution annuelle des précipitations.....	51
Figure IV-3: Evolution des températures annuelles.....	51
Figure IV-4: Evolution annuelle de l’évaporation.....	52
Figure IV-5: Evolution mensuelle des précipitations.....	53
Figure IV-6: Evolution mensuelle des températures.....	53
Figure IV-7: Evolution mensuelle de la température-évaporation	54
Figure IV-8: Evolution annuelle des apports- précipitations	55
Figure IV-9: Evolution mensuelle des apports liquides-précipitation.....	56
Figure IV-10: La variation annuelle du volume d’eau de la retenue en fonction des précipitations.....	56
Figure IV-11: La variation mensuelle du volume d’eau de la retenue en fonction des précipitations.....	57
Figure V-1 :Diagramme de Piper des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh.....	71
Figure V-2 : Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh (2000).	73
Figure V-3 : Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh (2001).	73
Figure V-4 : Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh (2002).	74
Figure V-5 : Diagramme des analyses des eaux de surface du barrage de Hammam Debagh (2003).	74
Figure V-6 : Projection des variables sur le plan factoriel F1/F2.....	79
Figure V-7 : Projection des variables sur le plan factoriel F1/F3.....	79
Figure V- 8 : Projection des variables sur le plan factoriel F1/F4.....	80
Figure V- 9 : Evolution des températures de l’eau et de l’air.....	82
Figure V-10 : Evolution du pH en fonction de la matière organique.....	83
Figure V-11 : Evolution du pH en fonction du volume de la retenue d’eau.....	83
Figure V-12 : Variation de la conductivité électrique avec le résidu sec de l’eau du barrage Hammam Debagh.....	84

Figure V-13 :Evolution de résidu sec en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.	85
Figure V-14:Evolution de la teneur du calcium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.	86
Figure V-15: Evolution de la teneur du magnésium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.	87
Figure V-16 : Evolution de la teneur du potassium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.	88
Figure V-17: Evolution de la teneur du sodium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.....	88
Figure V-18: Evolution de la teneur du chlorure en fonction d u volume d'eau de la retenue dans le temps.....	89
Figure V-19: Evolution de la teneur du bicarbonate en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.....	90
Figure V-20: Evolution de la teneur du sulfate en fonction du volume d'eau de la retenue.	91
Figure V-21: Evolution de la teneur du phosphate en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.....	92
Figure V-22: Evolution de la teneur du nitrate en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.....	93
Figure V-23: Evolution de la teneur du nitrite en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.....	94
Figure V-24: Evolution de la teneur d'ammonium en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.....	95
Figure V-25: Evolution de la DBO ₅ en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps..	96
Figure V-26: Evolution de la DCO en fonction du volume d'eau de la retenue.....	97
Figure V-27: Evolution de rapport DCO/DBO ₅ dans le temps.....	98
Figure V-28: Evolution de la teneur d'oxygène dissous en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.	99
Figure V-29: Evolution des teneurs en MES en fonction du volume d'eau de la retenue dans le temps.	100
Figure V-30: Classification des eaux d'irrigation du barrage de Hammam Debagh selon la méthode de S.A.R.	106
Figure V-31: Classification des eaux d'irrigation du barrage de Hammam Debagh d'après la méthode de WILCOX.....	107

Liste des Tableaux

Tableau 1: Classification des eaux selon le résidu sec.....	13
Tableau II-1 : Répartition des différents types de roches dans le bassin versant.....	24
Tableau II-2 : La distribution des classes de perméabilité du bassin versant.....	32
Tableau III-1: Paramètres morphométriques de Oued Bouhamdene	44
Tableau IV-1: Caractéristiques des données mensuelles climatiques, des apports liquides et du volume de la cuvette du barrage de Hammam Debagh.....	48
Tableau IV-2 : Calcul de l'ETP selon la formule de THORNTHWAITE.	58
Tableau IV-3 : Calcul de l'ETP selon la formule de TURC.....	59
Tableau IV-4 : Bilan hydrologique de THORNTHWAITE.....	63
Tableau IV-5 : Les composantes du bilan hydrologique.....	65
Tableau V-1 : Caractéristiques statistiques des éléments physico-chimiques et biologiques...	70
Tableau V-2 : Classification des eaux selon SCHOELLER-BERKALOFF.....	72
Tableau V-3 : Pourcentage de variance exprimée.....	76
Tableau V-4 : Matrice des corrélations entre les différents variables.....	77
Tableau V-5 : Grille de qualité globale.....	92
Tableau V-6 : Norme Algérienne et de l'OMS des substances chimiques appliquées aux eaux de Hammam Debagh.....	102
Tableau V-7 : Qualité de l'eau pour l'irrigation selon la conductivité électrique.....	103

Résumé

L'étude hydroclimatologique et hydrochimique du bassin versant de Oued Bouhamdene au barrage de Hammam Debagh situé au Nord-Est de l'Algérie, a permis d'avoir un aperçu sur l'état quantitatif et qualitatif de la réserve en eau de la région. L'étude hydroclimatologique montre que la zone d'étude est caractérisée par un climat subhumide, le régime climatique est caractérisé par la présence de deux saisons, l'une fraîche et humide et l'autre, chaude et sèche. Ceci a une influence sur le chimisme des eaux du barrage de Hammam Debagh par dilution pendant les périodes pluvieuses et par concentration par évaporation pendant la période sèche. L'étude hydrochimique des eaux du barrage a montré que le chimisme des eaux du barrage n'est pas lié seulement à la nature des terrains traversés, il peut être influencé par une pollution anthropique. La variation des éléments chimiques en fonction du volume d'eau de la retenue montre que presque tous les éléments évoluent d'une manière inverse avec ce dernier. Cette variation montre aussi que les eaux du barrage de Hammam Debagh contiennent une forte proportion de matière organique non dégradable.

Mots clés : Barrage, climat, pollution, hydrochimie.