

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider- Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique



جامعة محمد خيضر – بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية و الري

Ref: /2019

Mémoire de Master

Option : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

THEME

**ETUDE DE LA FAISABILITE DE LA RECHARGE DE
LA NAPPE D'EL MAADER (BOU SAADA) PAR LES
EAUX DE CRUES**

Etudiant :

Seif El Islam BENDINE

Encadreur :

Dr. Abdallah LABADI

PROMOTION : Juill 2019

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon encadreur le professeur LABADI ABDALLAH qui m'a donnée tous les types d'aide et d'encouragement depuis le début de cette initiation à la recherche jusqu'à la fin.

Mes immenses remerciements vont également aux membres de jury pour avoir accepté de juger et évaluer ce travail

Aussi mes remerciements vont à tous les professeurs et le staff du département de Génie Civil et d'Hydraulique pour leur travail pendant toutes ses années

Sans oublier les doctorants et les travailleurs dans le **Laboratoire d'Aménagements Hydrauliques et Environnement**

Je remercie tous mes amis et collègues pour leurs soutien et encouragements

Mes spéciales remerciements vont au staff de la subdivision de la direction de l'Hydraulique de Bou Saada surtout Monsieur Ameer HENNI (رحمة الله عليه) décédé il y'a un peu plus de mois, ainsi qu'à Monsieur le Directeur pour les informations et les données qu'ils m'ont donné et qui étaient très importants pour cette étude.

Enfin, je remercie toute personne qui a participé, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail,

Merci

DEDICACE

A mes chers parents qui ont attendu ce moment depuis longtemps,

c'est grâce à vous

A tous mes frères et sœurs et tous les membres de ma famille

je dédie ce travail

Ce travail est aussi dédié à tous mes amis et mes proches

et à mes chers collègues

ملخص

في هذه الدراسة ، بحثنا عن حلول بشأن إمكانية تغذية طبقة المياه الجوفية في منطقة بوسعادة التي تعاني من نقص في المياه في السنوات الأخيرة حيث يوجد مصدر واحد فقط هو المياه الجوفية وهيا في تناقص بسبب الاستهلاك المفرط.

بعد الدراسة الهيدرولوجية و الهيدروجيولوجية لوادي بوسعادة و وادي ميتر، توصلنا الى ان الحل يكمن في إستغلال كميات المياه بواسطة ثلاثة منشآت لإعادة شحن المياه بواسطة عتبات بالخرسانة أو بالجدارة تبني على عرض الواديان، و حفر آبار ماصة و أخيرا طرح الماء على الأسطح الحرة للتربة لتغذية طبقة المياه الجوفية.

Résumé

Parmi toutes les actions destinées à l'amélioration des eaux souterraines, la recharge artificielle constitue un outil de gestion, parfois précieux et aussi un remède pour assurer une restauration de la ressource. Elle consiste, en plus de l'alimentation naturelle, à introduire dans le réservoir souterrain des quantités importantes d'eau, essentiellement de surface pour leur éviter d'une part d'être perdues et pour pouvoir d'autre part les réutiliser dans des conditions de régime et de qualité différentes. Elle offre de même la possibilité, lorsque les conditions hydrogéologiques le permettent, de restaurer l'équilibre naturel des nappes.

C'est dans ce cadre que nous avons entrepris cette étude de faisabilité de recharge artificielle de la nappe d'El Maader (Bou Saada) qui présente un site propice et favorable à ce type de technique de gestion d'eau.

La solution choisie dans notre cas est un ensemble de dispositifs composé de seuils, de puits filtrants et de zone d'épandage installés au droit de deux oueds ; celui de Bou Saada et de Maitar. Ces dispositifs permettent un emmagasinement des eaux de crues et favorisent l'infiltration vers la nappe du Mio-Pliocène.

Abstract

This study focused on finding solutions concerning a potential recharge for the aquifer in Bou-Saada area which, in recent years, is affected by water-deficient. In fact, there is only one source that is groundwater and it is in decrease due to excessive consumption.

After the hydrologic and hydrogeologic study of Oued Bou-Saada and Oued Maitar, we suggested that the quantities of water should be exploited by means of three systems in order to recharge water: sills installed at the level of the two Oueds, absorbing wells and finally spreading water on the free-soil surfaces to recharge the aquifer.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

La recharge des nappes souterraines

I.1	Introduction.....	3
I.2	Définition de la recharge artificielle	3
I.3	Conditions préalables à la réalisation de la RAN	3
I.3.1	Les conditions Hydrogéologiques	3
I.3.2	Les conditions hydrologiques	4
I.3.3	Les conditions géochimiques et biologiques	4
I.4	Objectifs de la recharge artificielle	5
I.5	Les domaines d'utilisation.....	5
I.6	Les Problématiques et Les menaces qui affectent les Ressources en eaux	6
I.7	LES Eaux utilisées pour la recharge artificielle	6
I.8	Dispositifs d'alimentation artificielle de nappe souterraine	7
I.8.1	Dispositifs profonds.....	8
I.8.2	Dispositifs superficiels	8
I.8.2.1	Injection superficielle (bassin d'infiltration)	8
I.8.2.2	Filtre à sable (tertre d'infiltration).....	9
I.8.2.3	Par épandage d'eau de crues sur de grandes surfaces < système Legros >	10
I.8.2.4	Système Big Bag	11
I.8.2.5	Barrage et diguette (Seuils)-infiltration dans le lit d'un cours d'eau.....	11
I.9	Classifications des seuils	13
I.9.1	En fonction de la nature des matériaux constitutifs	13
I.9.1.1	Seuils en béton.....	13
I.9.1.2	Seuils en gabions	14
I.9.1.3	Seuils en enrochements	14
I.9.1.4	Seuils en moellons	15
I.9.1.5	Seuils mixtes.....	15
I.9.2	En fonction de la géométrie.....	16
I.10	Les principaux problèmes techniques.....	17
I.10.1	Le colmatage	17
I.10.2	Dépôt de matières en suspension.....	17

I.10.3	Développement bactérien	18
I.10.4	Croissance d'algues	18
I.11	Le choix du dispositif	18
I.12	Les principaux facteurs affectant la recharge	18
I.13	Le coût	19
I.14	Principaux avantages et inconvénients	19
I.14.1	Avantage	19
I.14.2	Inconvénients	19

Chapitre II

Cadres géographique, climatique et géologique

II.1	Introduction.....	20
II.2	Aperçu géographique	20
II.2.1	Situation géographique	20
II.2.2	Répartition administrative	21
II.2.3	Démographie	22
II.2.4	Développement de la ville de Bou Saâda	22
II.3	Le relief.....	23
II.4	Aspect climatologique	25
II.4.1	Les températures	25
II.4.2	Les précipitations	25
II.5	Aperçu géologique	26
II.5.1	Description lithostratigraphique	26
II.5.1.1	Le Néocomien.....	28
II.5.1.2	Le Barrémo-Aptien inférieur	28
II.5.1.3	L'Aptien supérieur	29
II.5.1.4	L'Albien inférieur	29
II.5.1.5	L'Albien supérieur	30
II.5.1.6	Le Cénomaniens	31
II.5.1.7	Le Turonien	31
II.5.1.8	Le tertiaire continental	32
II.5.1.9	Quaternaire	32
II.5.2	Aspect Structural	35
II.5.2.1	Dôme Triasique	35
II.5.2.2	Accident Nord Atlasique	36
II.6	Conclusion	37

Chapitre III

Etude hydrologique

III.1	Introduction.....	38
III.2	Les bassins versants de Bou saada.....	38
III.2.1	Réseau hydrographique	39
III.2.2	Caractéristiques morphologiques des bassins versants.....	40
III.2.2.1	Surface	40
III.2.2.2	Périmètre	41
III.2.2.3	Indice de compacité de Gravelius	41
III.2.2.4	Longueur du cours d'eau principal.....	42
III.3	Détermination des débits de crues	43
III.3.1	Données disponibles	44
III.3.1.1	Données hydrométriques	44
III.3.1.2	Données pluviométriques	44
III.3.1.2.1	Pluviométrie annuelle	46
III.3.1.2.2	Pluviométrie de 24 heures	46
III.3.1.2.3	Pluie de courte durée	48
III.4	Étude des crues	49
III.4.1	Méthode synthétique.....	49
III.4.1.1	Hypothèses de base.....	50
III.4.1.2	Pluies efficaces	50
III.4.1.3	Débits de pointe des crues	52
III.4.2	Méthode rationnelle (formule de TURAZZA)	54
III.4.3	Formule de POSSENTI	55
III.5	Conclusion	56

Chapitre IV

Etude de la recharge de la nappe de la plaine d'El Maader

IV.1	Introduction.....	57
IV.2	Considérations générales	57
IV.3	La plaine d'El Maader	58
IV.4	Evolution du niveau piézométrique	61
IV.5	Alimentation de l'aquifère	64
IV.5.1	Infiltration directe des précipitations	64
IV.5.2	Infiltration en période de crues	64
IV.5.3	Alimentation profonde	65
IV.6	Recharge de la nappe d'El Maader.....	65

IV.6.1	Dispositifs des seuils.....	65
IV.6.1.1	Les matériaux des seuils	66
IV.6.1.1.1	Gabionnage	66
IV.6.1.1.2	Seuil en béton	67
IV.6.1.1.3	Seuil avec blocs fusibles	68
IV.6.1.1.4	Objectif de la conception des blocs fusibles	68
IV.6.1.1.5	Augmentation de la capacité du stockage.....	68
IV.6.1.1.6	Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues	69
IV.6.2	Protection des berges	70
IV.6.3	Position et Caractéristiques des seuils sur oued Bou Saada	71
IV.6.4	Les puits d'infiltration	74
IV.6.4.1	Matériaux de construction	75
IV.6.4.2	Sécurités du site	76
IV.6.5	Epandage sur des surfaces libres	76
IV.6.5.1	Le site d'épandage	76
IV.6.6	Position et Caractéristiques des seuils sur oued Maiter	77
IV.6.6.1	Les puits filtrants	79
IV.7	Faisabilité d'un dispositif de recharge artificielle et moyens de surveillance	79
IV.8	Conclusion	80
Conclusion générale		81
Références bibliographiques.....		83

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma présentant une partie des différents types de recharges artificielle dans différents environnements hydrogéologiques .	7
Figure I.2 : Schéma simplifié d'une technique d'injection.	8
Figure I.3 : Schéma simplifié de la technique de recharge par bassin d'infiltration.	9
Figure I.4 : Schéma et photo réelle de filtre à sable	10
Figure I.5 : Schéma représentant le système big bag.	11
Figure I.6 : Les digues	13
Figure I.7 : Seuil en béton.	13
Figure I.8 : Seuil en gabion.	14
Figure I.9 : Seuils en moellons	15
Figure I.10 : Schéma des différents types des seuils	16
Figure I.11 : Le colmatage du bassin d'infiltration	17
Figure II.1 : Situation géographique du secteur d'étude	21
Figure II.2 : Les grands ensembles du relief.	24
Figure II.3 : Moyenne mensuelle des températures minimales et maximales à Bou Saada	25
Figure II.4 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles au niveau d'oued Bou Saâda (1985-2015).	26
Figure II.5 : Colonne stratigraphique simplifiée des terrains Secondaires	27
Figure II.6 : Coupe géologique de Djebel Kerdada	29
Figure II.7 : Grès de l'Albien inférieur.	30
Figure II.8 : Coupe géologique de Djebel Araar, plis monoclinale.	30
Figure II.9 : Calcaires marneux.	31
Figure II.10 : Coupe géologique de Djebel El Hamel, synclinal perché.	32
Figure II.11 : Log stratigraphique du forage d'El Maader	33
Figure II.12 : Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Chott El-Hodna.	34
Figure II.13 : Dôme Triasique de « Zerigat ».	35
Figure II.14 : Coupe géologique de la zone de Bou Saada	36
Figure II.15 : Carte géologique de la région d'étude	37
Figure III.1 : Les sous bassins versants de Chott El-Hodna.	38
Figure III.2 : Carte de réseau hydrographique de l'oued Maiter	39
Figure III.3 : Carte de réseau hydrographique de l'oued Bou Saada	40
Figure III.4 : Carte des bassins versants étudiés	41
Figure III.5 : Carte de répartition du coefficient de variation de la pluviosité de Bou Saâda (Selon Body)	45
Figure III.6 : Hauteurs de Pluies de durée et de fréquence différentes.	48
Figure III.7 : L'intensité de la pluie efficace en fonction du temps	52
Figure III.8 : Choix de l'averse critique	53
Figure IV.1 : Situation de la plaine d'El Maader	58
Figure IV.2 : Disposition des nappes dans la région d'El Maader	59
Figure IV.3 : Coupes géoélectriques établies par la CGG à l'ouest du chott	60

Figure IV.4 : Carte de situation des sondages électriques au Nord d'El Hodna (2002).	60
Figure IV.5 : Piézométrie de la plaine d'El Maader – Mars-Avril 1989 (extrait de la carte hydrogéologique, ANRH)	61
Figure IV.6 : Forages alimentant la ville de Bou Saada (1993)	62
Figure IV.7 : Rabattements de la nappe d'El Maader sur la période 1970-2005	63
Figure IV.8 : Crue de oued Bou Saada	64
Figure IV.9 : Photo du seuil (Haous Marrakech royaume du Maroc 2013)	66
Figure IV.10 : Coupe technique transversale de seuil en gabion	67
Figure IV.11 : Construction des seuils par béton (Haous Marrakech Royaume du Maroc)	68
Figure IV.12 : Schéma descriptif d'un bloc fusible	69
Figure IV.13 : Déversoir équipé par des blocs fusibles	70
Figure IV.14 : Berge protégé par gabion	70
Figure IV.15 : Protection de la berge par seuil	71
Figure IV.16 : Caractéristiques des seuils sur oued Bou Saada	72
Figure IV.17 : Estimation de la position des seuils sur oued Bou Saada	72
Figure IV.18 : Photo réelle d'oued Bou ssada dans la partie de déviation	73
Figure IV.19 : Puit filtrant dans la région de Ghardaia	74
Figure IV.20 : Puits filtrants absorbant.....	75
Figure IV.21 : Modèle de coupe pour réaliser les drains.	75
Figure IV.22 : Schéma d'un seuil avec un puit absorbant.	76
Figure IV.23 : Epanchage des eaux de crues.	77
Figure IV.24 : Le lit d'Oued Maiter	78
Figure IV.25 : Caractéristiques des seuils sur oued Maiter	78
Figure IV.26 : Estimation de la position des seuils sur oued Maiter	79

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Evaluation et évolution de la population de Bou Saada	22
Tableau III.1 : Données des apports de la station de Moulin Ferrero	44
Tableau III.2 : Caractéristiques du bassin versant de oued Bou Saada	45
Tableau III.3 : Valeurs du coefficient de variation	46
Tableau III.4 : Variables de Gauss	47
Tableau III.5 : Pluies de 24 heures	47
Tableau III.6 : Les précipitations journalières	48
Tableau III.7 : Pluies de différentes durées	49
Tableau III.8 : Pluies efficaces	51
Tableau III.9 : Intensité de la pluie efficace	51
Tableau III.10 : Débit maximum de pointe	53
Tableau III.11 : Débits de pointe en fonction des précipitations (temps de concentration)	55
Tableau III.12 : Valeurs des débits max en fonction de la fréquence	55
Tableau III.13 : Débits maximum obtenus par différentes méthodes.....	56
Tableau IV.1 : Caractéristiques des seuils sur oued Bou Saada	72
Tableau IV.2 : Caractéristiques des seuils sur oued Maiter.....	78

INTRODUCTION GENERALE

Le monde doit faire face dans le prochain futur à des problèmes d'approvisionnement en eau qui ne font que s'aggraver au cours du temps partout dans le monde, en raison de la croissance démographique qui ne cesse de doubler à des intervalles de temps de plus en plus serrés qui a induit une augmentation dans la demande en eau potable. Il faut ajouter la mauvaise gestion et la surexploitation des eaux souterraines dans beaucoup de régions aboutissant ainsi à un assèchement des nappes d'eaux.

Le développement actuel de la connaissance en matière d'eaux de surfaces d'une part et des aquifères poreux d'autre part a énormément aidé dans la progression de la GIRE (gestion intégrée des ressources en eau) qui est définie comme l'ensemble des actions à conduire pour assurer une protection et optimisation de l'exploitation des ressources disponibles afin que ces ressources puissent répondre aux besoins des populations de façon durable.

Face à tous ces problèmes de gestion, la Recharge Artificielle des Nappes ou RAN a été proposée pour aider à trouver des solutions. Cette technique à évoluer avec le temps pour passer d'une simple opération d'augmentation de l'infiltration naturelle dans une nappe à une technique beaucoup plus complexe.

Ainsi, la RAN fait partie des nouvelles méthodes s'intégrant dans la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) et se présente comme une alternative complémentaire aux aménagements de surface.

La nappe d'El Maadeer, située au Nord-Est de la ville de Bou Saada, est soumise à des prélèvements sans cesse croissants qui dépassent les capacités naturelles de sa recharge. La persistance de cette situation risque de compromettre le développement de la région :

Baisse des niveaux piézométriques : dans le secteur d'étude le niveau a enregistré une baisse de plus de 40 m ;

Diminution de la productivité des ouvrages : Le volume annuel d'eau souterraine prélevé pour l'AEP a considérablement baissé, passant dans un certain forage de 44l/s à moins de 10l/s.

Cette situation a poussé les agriculteurs à changer le type de cultures d'une part et à augmenter la profondeur des ouvrages pour une meilleure exploitation de la nappe.

L'objectif de ce travail est de réaliser une étude de faisabilité d'un projet de recharge artificielle dans l'oued Bou Saada et oued Maiter par l'identification des sites choisis pour l'implantation des seuils visant à ralentir les vitesses des écoulements et favoriser l'infiltration.

Le présent travail est subdivisé en quatre parties que l'on peut résumer comme suit :

Le premier chapitre consiste à présenter la recharge artificielle et ses concepts et théorie. Les différentes méthodes de réalimentation d'une nappe ont été définies.

Le deuxième chapitre porte sur la présentation de notre zone d'étude. Nous avons jugé qu'il est primordial de montrer les aspects géographique, climatique et géologique de la région de Bou Saada pour faire apparaître l'importance de la région d'étude.

Le troisième chapitre couvrira l'étude hydrologique de la zone d'étude afin de connaître les apports annuels et déterminer les débits des crues. Il faut signaler dans ce contexte la rareté des données hydrologiques qui nous ont obligés à utiliser des formules empiriques afin de combler les lacunes concernant les débits maximum et les débits de projet.

Le quatrième chapitre traite des grands traits hydrogéologiques de la région d'El Maader et de la possibilité de recharge de la nappe du Mio-Pliocène à partir des eaux de crues de oued Bou Saada et oued Maiter. Nous avons essayé, malgré le manque de données, de proposer des préconisations concernant le choix des sites, la faisabilité de cette technique.

Chapitre I

La recharge des nappes souterraines

I.1 INTRODUCTION

Face aux besoins en eau sans cesse grandissants, le concept de l'alimentation ou recharge artificielle des nappes des eaux souterraines apparaît comme étant un moyen efficace d'établir une meilleure gestion des ressources en eau.

Ce chapitre présente une synthèse des connaissances sur le sujet : typologie des dispositifs de recharge artificielle par objectif, par origine de l'eau ou par technique de recharge, contraintes hydrogéologiques et réglementaires, risques sanitaires et environnementaux. Il propose des préconisations concernant le choix des sites, la faisabilité technique et les moyens de surveillance à mettre en œuvre [1].

I.2 DEFINITION DE LA RECHARGE ARTIFICIELLE

La recharge artificielle des nappes (RAN) est une pratique qui vise à augmenter les volumes d'eau souterraine disponibles en favorisant, par des moyens artificiels, son infiltration jusqu'à l'aquifère.

Elle est une des mesures qui peut être mise en œuvre pour sécuriser l'approvisionnement en eau, compenser certains effets du changement climatique et plus généralement aménager la pression quantitative et qualitative sur les masses d'eau souterraine. Elle ne doit, toutefois, pas remplacer une gestion basée sur la réduction des prélèvements et l'adaptation de ceux-ci à la disponibilité de la ressource [1].

I.3 CONDITIONS PREALABLES A LA REALISATION DE LA RAN

I.3.1 Les conditions Hydrogéologiques

La présence de formations géologiques qui favorisent le stockage (aquifère). Des caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère qui aident l'introduction et le stockage de l'eau dans l'aquifère comme une épaisseur de la zone non saturée suffisamment importante pour permettre une remontée significative de la nappe dans le cas d'une nappe libre. De plus, la surface de la nappe ne doit donc pas être trop proche de la surface du sol afin de ne pas occasionner des désordres en surface et d'assurer une meilleure autoépuration.

Une transmissivité dans la zone non saturée de l'aquifère qui ne doit pas être trop faible pour permettre un stockage significatif, ni trop grande pour ne pas évacuer très rapidement les volumes injectés.

Dans le cas des nappes captives, les conditions aux limites physiques et chimiques du système doivent permettre l'injection de volumes additionnels d'eau en déplaçant les mêmes volumes d'eau native [3].

I.3.2 Les conditions hydrologiques

La présence d'une ressource d'eau adéquate pour fournir l'eau de recharge (cours naturel d'eau, période de crue d'une rivière, station de traitement des eaux usées ou des effluents industriels, station de désalinisation de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre) capable de fournir les volumes d'eau de recharge durant la durée de vie du projet estimée généralement à 20 ans.

La connaissance des variations climatiques saisonnières dans le cas d'une eau naturelle de recharge (variations des précipitations, de la température et de l'hygrométrie) et de leur impact sur le régime hydrologique de la ressource (périodes de crue et d'étiage).

Une qualité d'eau brute destinée à la recharge qui doit répondre à certaines normes afin de minimiser les coûts inhérents et de conserver la rentabilité du projet.

I.3.3 Les conditions géochimiques et biologiques

La géochimie de l'eau de recharge, de l'eau originale de l'aquifère et de la roche réservoir doit être caractérisée. Les interactions fluide-fluide et fluide-roche doivent être rigoureusement identifiées parce qu'elles peuvent avoir un impact négatif sur le dispositif de RAN adopté.

L'autoépuration par des processus de traitement naturel et l'extraction des nutriments et d'autres microorganismes pathogènes et xenobiotiques non désirés peuvent fournir un avantage additionnel.

Les formations épaisses et les nappes captives, entre autres, conviennent pour le stockage.

Dans les nappes alluviales, la zone non saturée peut être réduite tandis que dans les formations fissurées et karstiques, les circulations peuvent être trop rapides de ce fait, le stockage et l'épuration peuvent être limités.

Les conditions déjà citées vont déterminer le volume d'eau à injecter, le volume récupérable et l'efficacité du dispositif de RAN utilisé, par suite le succès du projet de RAN. [3]

I.4 OBJECTIFS DE LA RECHARGE ARTIFICIELLE

Les objectifs de la RAN peuvent être multiples et très diversifiés :

- Stockage saisonnier et récupération d'eau.
- Stockage d'eau à long terme.
- Création de réserve stratégique d'eau.
- Remontée des niveaux d'eau et accroissement des débits dans les puits de production.
- Restauration des niveaux des eaux souterraines.
- Réduction des coûts de pompages par la remontée des niveaux.
- Stockage d'énergie hydro thermique.
- Contrôle hydraulique d'eau contaminée.
- Prévention contre l'intrusion des eaux salines.
- Contrôle des inondations.

I.5 LES DOMAINES D'UTILISATION

La recharge artificielle de la nappe est utilisée dans :

- Les régions arides à pluviométrie saisonnière avec la mise en place d'un barrage qui permettra de reconstituer une réserve d'eau souterraine.
- Les villes où le débit d'exploitation de la nappe est supérieur à sa capacité et dont la principale ressource en eau est une rivière à forte pollution organique : Dans ce cas, le pompage de l'eau et sa réinjection dans la nappe permet de la recharger et de produire une eau de bonne qualité par épuration naturelle qui pourra être utilisée pour l'alimentation en eau potable.

I.6 LES PROBLEMATIQUES ET LES MENACES QUI AFFECTENT LES RESSOURCES EN EAUX

Parmi les problématiques et les menaces qui affectent les ressources en eaux nous pouvons citer :

- Ressources en eau limitées.
- Répartition spatio-temporelle inégale.
- Surexploitation des ressources en eau souterraines.
- Technique d'irrigation non économe en eau (Irrigation traditionnelle).
- Forte croissance de la demande en eau.
- La fréquence d'années sèches successives qui entravent le renouvellement annuel des ressources en eau.
- L'impact des changements climatiques.
- La pollution des ressources eau (cours d'eau, nappes,...) par rejets solides ou liquides dans le milieu, les cours d'eau et les nappes d'eau souterraines vulnérable.[2]

I.7 LES EAUX UTILISEES POUR LA RECHARGE ARTIFICIELLE

Le premier critère fondamental concernant la faisabilité d'un projet de recharge artificielle est la disponibilité de l'eau de recharge à proximité du site d'injection afin d'assurer un apport régulier et limiter des coûts potentiels de transport. Un aquifère peut ainsi être réalimenté à partir de plusieurs types d'eau. On distingue en général deux types d'eau utilisés pour la recharge : les eaux de surface issues des cours d'eau et les eaux usées traitées.

En raison de leur disponibilité, les eaux de surface issues de cours d'eau sont généralement utilisées si l'objectif de la recharge artificielle est principalement quantitatif. Il est toutefois difficile d'utiliser ce type d'eau en période déficitaire sans dégrader le débit du réseau hydrographique.

Le deuxième type d'eau utilisé pour la recharge artificielle est l'eau usée traitée (actuellement interdite en France). Les enjeux diffèrent de ceux de la recharge artificielle par eau de surface. A l'échelle mondiale, les pressions exercées sur les ressources en eaux sont appelées à s'intensifier. Ces pressions viennent notamment de l'accroissement démographique associé à la concentration de la population dans les zones urbaines, en particulier en zone littorale, et

induisent une dégradation qualitative et quantitative des nappes d'eau, plus marquée sur le littoral où cela se traduit notamment par l'intrusion progressive d'eau de mer. Les efforts considérables de mobilisation des ressources en eau atteignant à plus ou moins long terme leurs limites tant physiques qu'économiques, les efforts à mener au cours des prochaines décennies doivent se focaliser sur une gestion plus efficace de la ressource, assurant à la fois sa protection et l'optimisation de son exploitation [1].

I.8 DISPOSITIFS D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE DE NAPPE SOUTERRAINE

Les dispositifs d'infiltration sont utilisés pour alimenter les nappes libres ou surmontées d'une épaisseur de terrain imperméable assez petite pour que l'on puisse la décaper.

Il s'agit essentiellement de bassins d'infiltration, mais aussi de canaux, fossés, fosses, lits de cours d'eau aménagés, zones d'épandage souterrain, puits filtrants...

Ce sont en général des dispositifs de surface, exception faite pour les dispositifs d'épandage souterrain par réseau de drains [5].

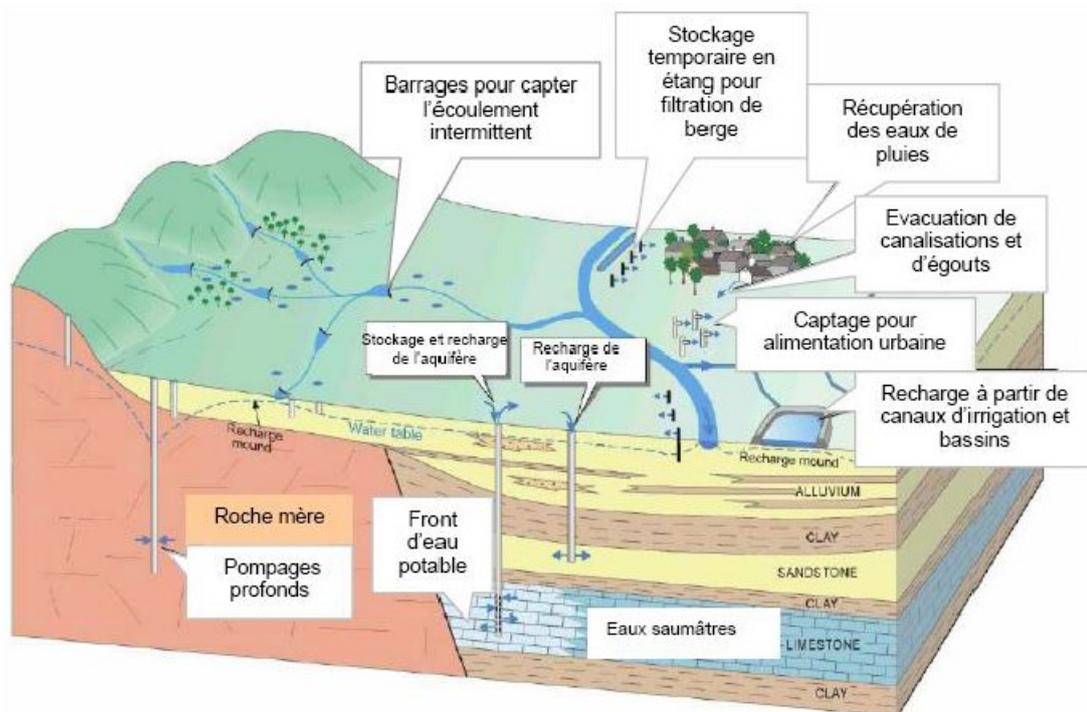


Figure I.1 : Schéma présentant une partie des différents types de recharges artificielle dans différents environnements hydrogéologiques [1].

I.8.1 Dispositifs profonds

Ce dispositif consiste à utiliser un puits pour en faire un usage double, c'est-à-dire qu'on peut l'utiliser pour l'alimentation et l'extraction en eau.

Ce procédé est notamment utilisé lorsqu'il existe une couche imperméable entre la surface du sol et la nappe. L'action épuratrice du sol intervenant peu pour les eaux d'injection, le traitement de celles-ci doit être plus élaborée que dans le cas de bassins.

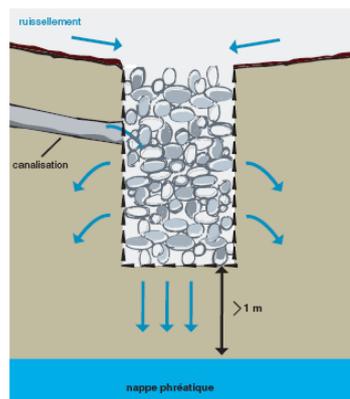


Figure I.2 : Schéma simplifié d'une technique d'injection

I.8.2 Dispositifs superficiels

I.8.2.1 Injection superficielle (bassin d'infiltration)

Les bassins sont souvent réalisés en déblai-remblai, l'eau est préalablement traitée ou non en fonction de son origine et de sa qualité et dirigée dans le bassin. Elle s'infiltré préférentiellement par le fond, l'infiltration a également lieu, mais dans une moindre mesure, par les parois.

Cette technique est sujette au colmatage, il est donc nécessaire de s'assurer de la qualité des eaux à infiltrer et de prévoir les opérations d'entretien nécessaires, d'évaluer leur fréquence et d'estimer leur coût, (critère de faisabilité économique importante).

Ils peuvent aussi bien être utilisés pour l'infiltration d'eau en provenance de cours d'eau que d'effluents préalablement traités [7].

Bassin d'infiltration	
Avantage	Inconvénients
Possibilité d'utilisation des différents types d'eaux de recharge	Colmatage d'origine physique, biologique, chimique de la zone d'infiltration
Infiltration de volumes d'eau importants	Processus de colmatage quasi-irréversible
Epuración des eaux recharge lors de leur filtration à travers la zone non saturée de l'aquifère, ce qui implique une réduction des étapes de prétraitement de ces eaux	Taux d'infiltration variable suivant la technique utilisée
Amélioration de la capacité géo-épuratoire du système via l'ajout de couches de sable et/ou la mise en place de géotextile	Besoin d'une emprise au sol conséquente
Possibilité d'inclusion de végétation augmentant la perméabilité du sol et les propriétés géo-épuratoires du dispositif	Taux d'infiltration diminuant au cours du temps
Cout de mise en place relativement faible	
Facilité d'entretien	
Diversité des sites d'installation en raison du nombre important de nappes alluviales	
Application dans le cas d'AEP	

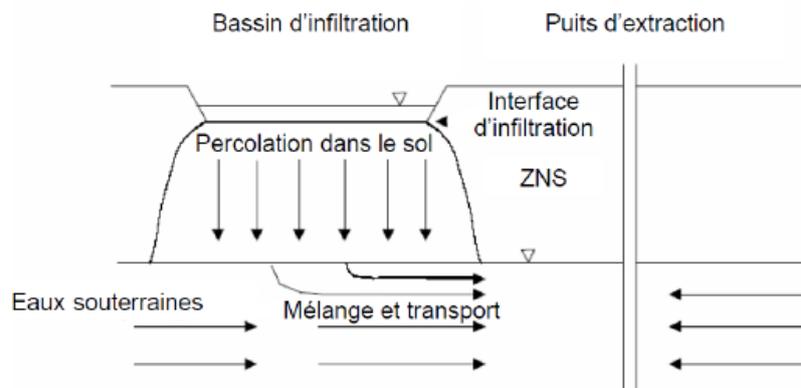


Figure I.3 : Schéma simplifié de la technique de recharge par bassin d'infiltration [1].

I.8.2.2 Filtre à sable (tertre d'infiltration)

Ces techniques sont utilisées en général lorsque l'un des objectifs est le traitement d'eau (eau usée, eau superficielle pour utilisation en eau potable...).

Les eaux à infiltrer sont épandues à la surface d'un massif sableux (en place ou reconstitué) par l'intermédiaire de drains, ou par écoulement direct. Lorsque la surface piézométrique de la nappe phréatique est trop proche du sol, un tertre d'infiltration en matériaux sableux peut être mis en œuvre, les dispositifs (terrassment important, approvisionnement de matériaux

sableux lorsqu'ils n'existent pas sur place) ne peuvent pas a priori intéresser de grands volumes d'eau à infiltrer et seront donc utilisés plutôt dans un contexte local (assainissement autonome par exemple).

La faisabilité économique du projet dépend de l'investissement mais également beaucoup des coûts de fonctionnement.

Afin de favoriser l'aération du massif d'infiltration, il est nécessaire de pratiquer une alimentation alternée, ce qui implique de multiplier les surfaces d'infiltration en fonction de la durée des cycles (alternance alimentation et mise au repos des bassins).

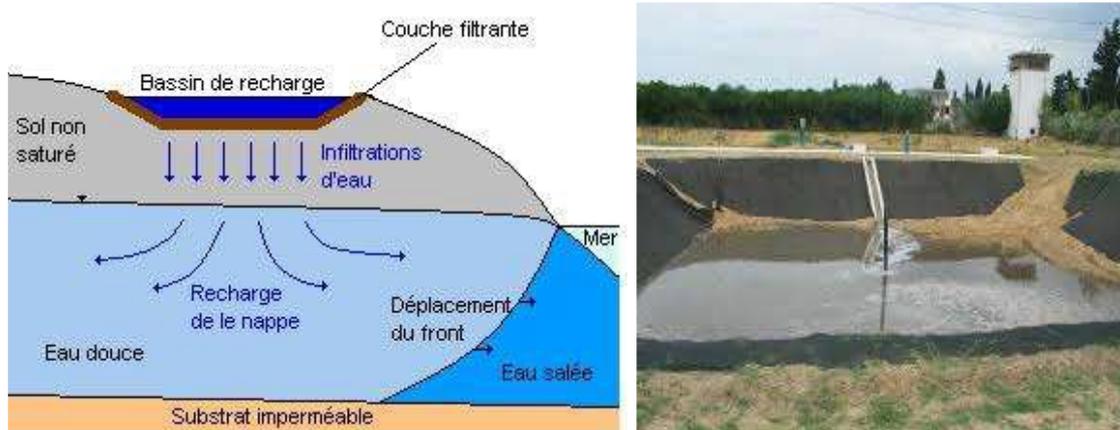


Figure 1.4 : Schéma et photo réelle de filtre à sable

1.8.2.3 Par épandage d'eau de crues sur de grandes surfaces < système Legros >

L'eau à infiltrer est épandue en général sur des terres agricoles, par l'intermédiaire de rainures (sillon de labour), son écoulement peut être freiné par la réalisation de diguettes de faible hauteur.

La ressource en eau est constituée par des eaux de cours d'eau en période excédentaire, hors période culturale.

Ces techniques sont bien adaptées aux pays en voie de développement à main d'œuvre bon marché.

On peut rapprocher ces techniques de celles utilisées dans certains pays froids (Islande, USA, Canada, Danemark) : accumulation par l'homme de neige sur des aires propices à la réalimentation. Au redoux, l'eau issue de la fonte des neiges percolera lentement vers la nappe et contribuera ainsi à sa recharge.

La réalisation de dispositif de rétention des sols et des eaux pour lutter contre l'érosion des sols, en créant des zones humides artificielles de façon temporaire, a pour effet secondaire une recharge renforcée des eaux souterraines.

Le danger de cette pratique réside dans l'éventualité d'un lessivage excessif des terres agricoles ce qui peut entraîner une pollution par les engrais et les pesticides ou une salinisation des eaux souterraines. Il est donc nécessaire d'optimiser les surfaces d'épandage en fonction des besoins de recharge et des flux d'éléments indésirables pouvant transiter jusqu'à la nappe.

1.8.2.4 Système Big Bag

Le système consiste en une barrière constituée de grands sacs remplis de tout venant d'oued ou de terres pour stopper une partie des eaux afin d'augmenter le taux de recharge de la nappe dans les oueds et pour permettre aux agriculteurs de la région de leurs terres au lieu d'utiliser les eaux de la nappe.

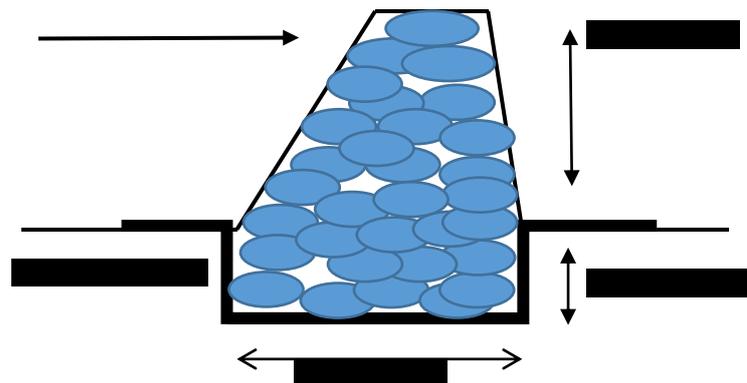


Figure I.5 : Schéma représentant le système big bag

-  Sac rempli de graviers, d'argiles ou de sable d'oued
-  Couche de 30 cm d'argiles et de chaux (2 sacs d'argile pour un sac de chaux) pour assurer l'adhérence entre les graviers du lit de l'oued et les sacs.

1.8.2.5 Barrage et diguette (Seuils)-infiltration dans le lit d'un cours d'eau

L'objectif est d'accroître le rendement de l'infiltration naturelle en cherchant à gagner sur :

- la surface de la plage d'infiltration.
- la charge hydraulique.
- la durée de l'infiltration.

Le gain de surface d'infiltration peut être obtenu par dérivation d'une partie du débit d'un lit mineur actif vers un ou plusieurs bras morts.

Une autre possibilité est l'aménagement de levées qui vont allonger le trajet des eaux de ruissellement dans le lit (digues en chicane : Markus, Buswer, 1990).

La charge hydraulique, la durée d'infiltration mais également la surface d'infiltration peuvent être augmentées par création d'un ou plusieurs barrages sur un cours d'eau dans les zones propices à l'infiltration (terrain perméable, cours d'eau perché par rapport à la nappe).

Ces dispositifs ont tous comme caractéristique commune de piéger et/ou de ralentir les eaux de cours d'eau en crue charriant une masse importante de matière en suspension. Il existe plusieurs techniques pour limiter le dépôt de matière solide et donc le colmatage et le comblement progressif du réservoir. Ce sont :

- entretien : nettoyage et évacuation des dépôts.
- digue construite en matériaux meubles dimensionnée pour être emportée par une crue de fréquence donnée et donc permettre le nettoyage de l'amont. Une variante de ce dispositif consiste à réaliser une digue semi-destructive : seule une partie de la digue sera emportée par la crue.
- mise en place de barrage mobile ou gonflable que l'on abaisse lors du passage d'une crue pour permettre le nettoyage de l'amont où que l'on ne lève qu'une fois le pic de crue passé afin d'éviter la sédimentation des M.E.S présentes dans ses eaux ayant la plus forte charge solide.
- réalisation de barrages en cascade, les barrages se remplissant progressivement de l'amont vers l'aval, les premiers jouant le rôle de « barrière de décantation ».

Ces techniques sont essentiellement utilisées en pays arides ou semi-arides (Maroc-Tunisie-Arabie Saoudite, sud des États-Unis, Australie...).

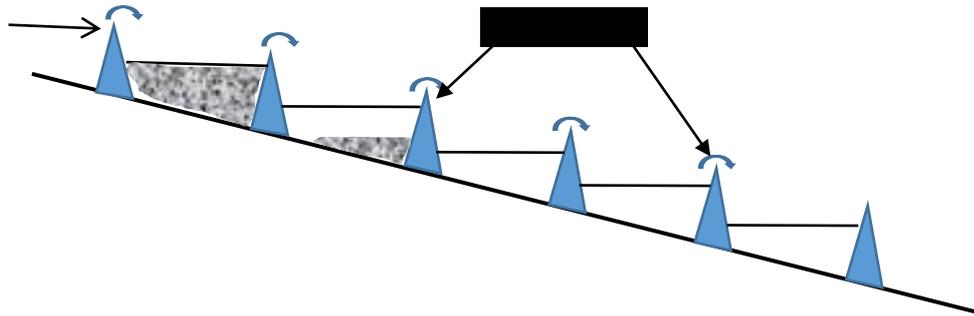


Figure I.6 : Les digues [5].

I.9 CLASSIFICATIONS DES SEUILS

I.9.1 En fonction de la nature des matériaux constitutifs

On peut classer les seuils en trois grandes catégories ordonnées suivant une souplesse croissante des ouvrages.

I.9.1.1 *Seuils en béton*

Ces ouvrages présentent une grande solidité d'ensemble (monolithisme) mais sont par contre très sensibles aux affouillements puisque le parement bétonné lisse ne dissipe pas l'énergie. Pour la conception des seuils en béton dans les rivières à fond mobile il est donc nécessaire de prévoir un dissipateur d'énergie efficace.



Figure I.7 : Seuil en béton [4]

1.9.1.2 Seuils en gabions

Un gabion est composé d'une structure métallique en grillage de forme parallélépipédique, remplie de pierres. Ce type de matériau, flexible et perméable est intéressant pour les seuils ou les bassins de dissipation lorsque que le coût de transport de gros enrochement devient prohibitif.



Figure I.8 : Seuil en gabion [4]

Une construction en gabions coûte moins cher qu'un ouvrage traditionnel. On peut utiliser des pierres en petits morceaux ou des cailloux, que l'on trouve généralement près du chantier pour remplir les cubes, sans devoir recourir à des matériaux spécifiques ou à de la main-d'œuvre spécialisée. Un ouvrage en gabions peut être construit sans équipement mécanique lourd. Une fois achevé, l'ouvrage en gabions sera immédiatement efficace à cent pour cent, sans qu'il soit nécessaire d'attendre comme c'est le cas normalement pour les ouvrages en béton. [4]

1.9.1.3 Seuils en enrochements

La construction de seuils en enrochements de carrière a tendance à se répandre surtout dans les régions où l'approvisionnement en gros blocs est aisé (proximité des lieux d'extraction ou possibilité d'ouverture de carrière pour les chantiers importants). Ces seuils présentent le triple avantage d'un coût de réalisation modéré, d'une grande souplesse et d'une dissipation d'énergie importante sur le parement aval des ouvrages dû à la rugosité des blocs, et se justifient également mieux sur le plan environnemental.

La taille des enrochements utilisés est fonction de leur nature (granite, calcaire) et de leur structure (fissurée ou non). On utilisera en général les blocs de grandes dimensions (blocs de 1T à 1,5T parfois jusqu'à 3T ou 4T), notamment pour les bassins de dissipation.

Les blocs sont parfois liaisonnés au béton ou au bitume. [4]

1.9.1.4 Seuils en moellons

Les seuils en moellons, dont certains sont pluriséculaires, ont été construits pour l'irrigation des terres agricoles ou pour l'alimentation de moulins. Ils ont généralement une faible hauteur de chute (1 à 4 mètres).

Ces seuils présentent un profil en travers de type triangulaire, c'est à dire avec un parement aval incliné. Ils sont constitués d'une carapace en pierres de taille réduite (30 à 50 kg environ), calée à la main de façon à garantir leur résistance au courant et plus ou moins épaisse, disposée sur son corps de remblai en matériaux tout-venant (figure 8). Parfois les moellons sont liaisonnés à la chaux ou clavés dans une charpente en bois qui augmente la solidité de l'ensemble. Ces structures sont classiques et exposent l'ouvrage à une dégradation rapide dans le cas où un morceau de carapace est emporté [4].

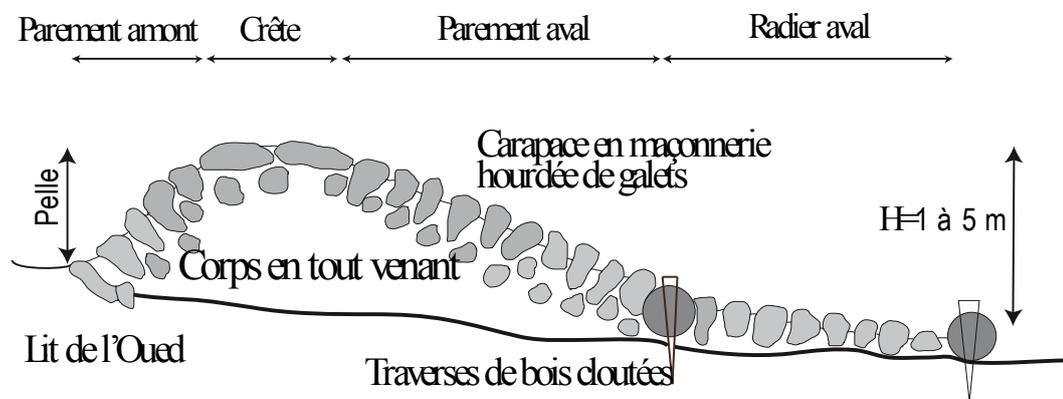


Figure 1.9 : Seuils en moellons

1.9.1.5 Seuils mixtes

On entend par seuils mixtes des seuils composés de plusieurs catégories de matériaux.

En fait la plupart des seuils sont mixtes (enrochements bétonnés, seuils en béton avec bassin de dissipation en gabion ou en enrochement...). Si l'association de matériaux différents paraît a priori favorable à la stabilité de l'ensemble, il faut cependant tenir compte de leurs

différences de comportement. La réalisation de seuils mixtes exige certaines précautions relatives à la perméabilité mais aussi à la souplesse spécifique à chaque matériau mis en œuvre [4].

I.9.2 En fonction de la géométrie

Le tracé en plan du seuil peut être rectiligne, incurvé ou en ligne brisée. L'axe d'implantation est souvent oblique par rapport à celui de la rivière. Cette position est justifiée par le tracé de la rivière et, s'il existe, de la position du canal de dérivation. De ce fait les ouvrages peuvent atteindre deux à trois fois la largeur de la rivière.

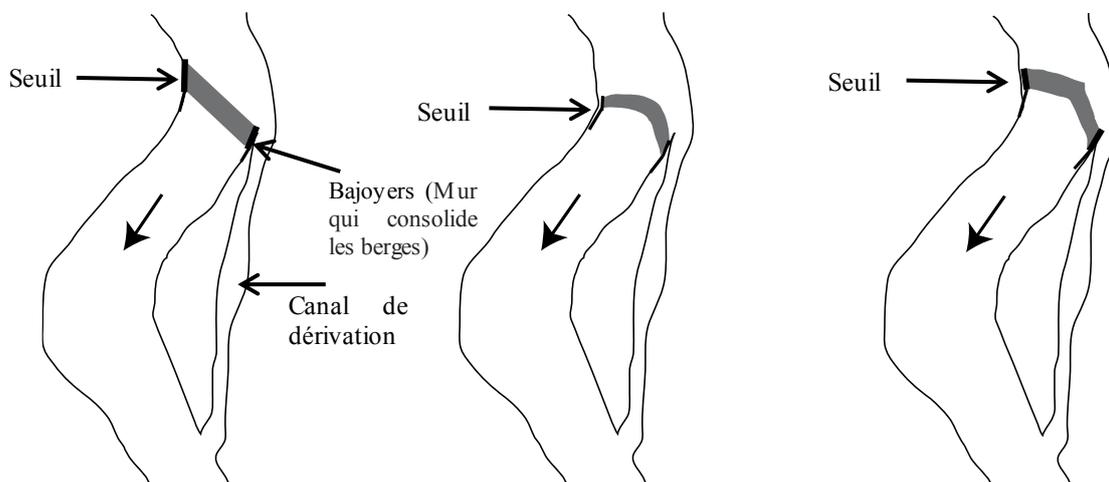


Figure I.10 : Schéma des différents types des seuils [4]

a- Seuil rectiligne

Le seuil rectiligne est la structure la plus fréquente, elle est notamment employée dans le cas de seuil en bétons (seuils massifs).

b- Seuil incurvé

Pour améliorer la résistance du seuil aux charges hydrauliques, on peut construire un seuil incurvé. Cette structure s'emploie fréquemment pour des petits ouvrages (en pierres, bois, pierre et bois).

c- Seuil en ligne brisée

Cette technique consiste à former un V dont les extrémités prennent appui en rive en position inversée (la pointe du V dirigée vers l'amont) de telle sorte que la structure s'arc-boute contre

le courant. Ainsi, l'ouvrage travaille en compression ce qui lui confère une grande solidité. Le profil du seuil se caractérise par une dépression en son centre ce qui permet de laisser passer le débit à une hauteur normale en situation habituelle. La pente et la largeur du bief, la force du courant et la capacité d'emmagasinement en amont forment des variables importantes à considérer.

I.10 LES PRINCIPAUX PROBLEMES TECHNIQUES

I.10.1 Le colmatage

Celui-ci a pour inconvénient principal de diminuer le débit d'injection et/ou d'infiltration et rend la prévision des débits, à terme, plus ou moins hasardeuse. Dans les deux cas, il oblige à un entretien régulier et coûteux, plus ou moins difficile en fonction des conditions d'accès permises par le type de dispositif utilisé



Figure I.11 : Le colmatage du bassin d'infiltration [4]

I.10.2 Dépôt de matières en suspension

Dans le cas des bassins d'infiltration essentiellement, la présence de particules en suspension dans l'eau de recharge est directement ou indirectement responsable d'une réduction de la perméabilité de la surface d'infiltration.

I.10.3 Développement bactérien

Lorsque les eaux contiennent des substances organiques dissoutes, des bactéries viennent à se développer. Elles se fixent sur la matrice du milieu poreux en s'entourant d'une pellicule d'eau (on parle alors de biofilm). Le développement de cette membrane organique près de la surface d'infiltration est un facteur de diminution de la perméabilité, observée même lorsque l'eau ne transporte pas de sédiments en suspension.

I.10.4 Croissance d'algues

Différents types d'algues peuvent influencer sur les performances d'un dispositif d'infiltration. On distingue les algues flottantes et les espèces benthiques (accrochées en fond d'ouvrage). Les espèces qui se forment sur la surface d'infiltration un tapis filamenteux vont, a priori, directement limiter la capacité d'infiltration. Cette couverture végétale retient également les sédiments. Ce phénomène peut alors conduire à un colmatage total ou partiel des bassins d'infiltration.

I.11 LE CHOIX DU DISPOSITIF

Le choix du dispositif mis en œuvre dépend de l'adéquation des quatre facteurs :

- Ressource en eau disponible pour la recharge.
- Contexte hydrogéologique.
- Surface disponible.
- Objectif.

I.12 LES PRINCIPAUX FACTEURS AFFECTANT LA RECHARGE

Les principaux facteurs affectant la recharge sont [6] :

- Le climat.
- La géologie.
- La topographie.
- Les propriétés physiques des sols.
- La végétation en place.

I.13 LE COUT

Le coût est très variable suivant la méthode utilisée. Dans tous les cas, il doit cependant être comparé à celui des autres solutions techniques alternatives qui permettraient d'arriver aux mêmes résultats en termes de disponibilité et de qualité d'eau pour les populations concernées. Dans le cas de construction de petites retenues dans les zones rurales, c'est un moyen alternatif à celui qui consiste à constituer une réserve d'eau superficielle.

Il convient de rappeler que le meilleur moyen de ne pas avoir à réalimenter une nappe, ou de le faire trop souvent est de ne pas gaspiller ni polluer l'eau, tant du fait de la population que de celui des agriculteurs, des artisans et des industriels.

I.14 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

I.14.1 Avantage

La réalimentation des nappes phréatiques a de nombreux avantages. Elle permet de maintenir en permanence une réserve d'eau de bonne qualité dans des conditions exploitables. Cette eau devient une ressource alternative qui permet de garantir l'approvisionnement en eau pour des usages potables ou non-potables en cas de sécheresse.

De plus, dans la mesure où la texture de sol permet un temps de contact suffisant entre le milieu aqueux et les particules, il se produit une autoépuration de l'eau par voie biologique. Dans plusieurs villes où la méthode est utilisée, l'eau pompée dans la nappe peut être injectée dans le réseau de distribution d'eau potable moyennant une simple chloration.

La recharge des nappes est aussi un moyen pour éviter l'intrusion saline dans les zones côtières.

I.14.2 Inconvénients

Elle nécessite la construction d'infrastructures qui peuvent être plus ou moins coûteuses suivant les méthodes mises en œuvre (barrages, station de pompage voire station de décantation).

La méthode n'est malheureusement pas applicable partout. Elle n'est pas envisageable sur un sol imperméable.

Chapitre II

***Cadres géographique,
climatique et géologique du
secteur d'étude***

II.1 INTRODUCTION

D'une superficie de 26 000 km², le bassin-versant du Hodna marque la transition entre le domaine tellien au nord et le Sahara au sud.

La disposition des reliefs montagneux du nord et du sud organisent le bassin versant du Hodna autour d'une cuvette fermée, située à 400 m d'altitude, et qui reçoit l'écoulement des eaux superficielles et souterraines de cette région. Au fond de la cuvette, le Chott El Hodna a une superficie de 1 150 km².

Le secteur d'étude fait partie des régions sud du Chott El Hodna.

II.2 APERCU GEOGRAPHIQUE

II.2.1 Situation géographique

La ville de Bou Saâda se trouve à 234 km au Sud-Est d'Alger, et à 13 km au Sud-Est de Chott El-Hodna, avec une latitude de 35°13' Nord et une longitude de 4°10' Est sur une altitude de 560m au-dessus du niveau de la mer.

Bou Saada est une daïra de la wilaya de M'Sila, peuplée d'environ 310 000 habitants. Elle est limitée au Nord par M'Sila, Biskra au Sud-Est et Djelfa du côté Sud-Ouest.

La plaine hodnéenne fait partie des Hauts Plateaux et appartient au domaine steppique, pré saharien. Elle est limitée:

- Au nord et au sud par la chaîne tellienne et la chaîne atlasique, respectivement aux environs des coordonnées géographiques 35°45' et 34° 30' de latitude Nord.
- A l'ouest et à l'est, par le débordement des formations atlasiques et la rencontre des deux chaînes (Monts des Aurès); respectivement aux coordonnées géographiques 04° 45' et 5° 45' de longitude Est.

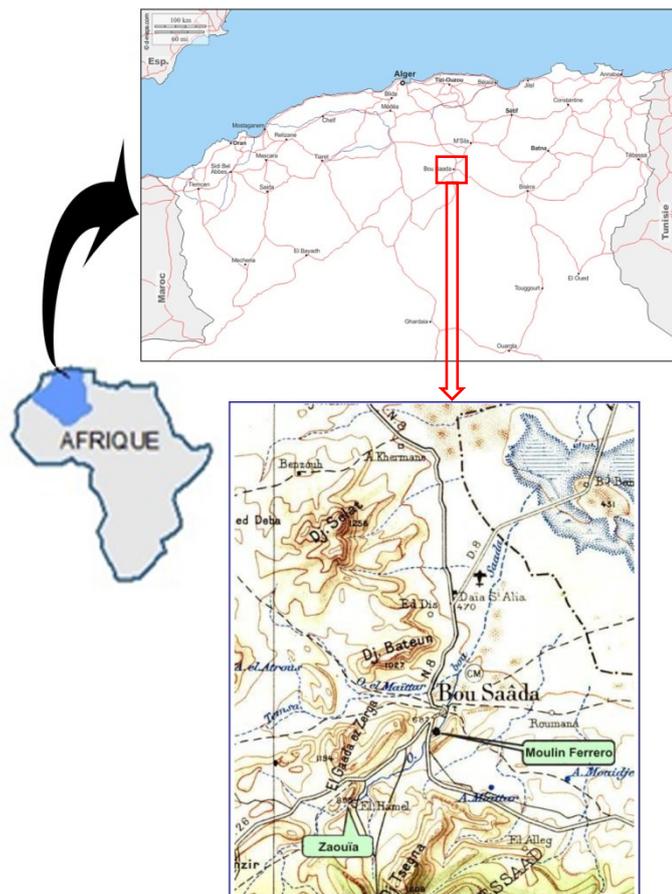


Figure II.1: Situation géographique du secteur d'étude

II.2.2 Répartition administrative

La commune de Bou Saada est limitée :

- Au nord par la commune d'Ouled Sidi Brahim.
- Au nord est par la commune de Maarif.
- A l'est par la commune d'El Houamed.
- A l'ouest par la commune de Tamsa.
- Au sud est par la commune d'Oueltem.
- Au sud-ouest par la commune d'El Hamel. [8]

II.2.3 Démographie

Bou Saada est la deuxième commune la plus peuplée de la wilaya de M'Sila après la commune de M'Sila, selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2008 (125 573 habitants), la population de la commune a été évaluée à 152 306 habitants en 2015.

Tableau II.1 : Evaluation et évolution de la population de Bou Saada [9].

1987	1998	2008	2015
66 688	104 029	125 573	152 306

II.2.4 Développement de la ville de Bou Saâda

Bou Saâda est située à la croisée des routes nationales (RN8 : Alger- Biskra, RN46 : M'Sila-Djelfa) qui constitue un important carrefour d'échange entre la méditerranée et le Sahara, mais aussi entre les Zibans et le littoral algérois, et entre le M'Zab et Constantine.

La région de Bou Saâda est aussi une zone touristique riche de ces Oasis et de ces cascades, d'ailleurs on dit "Oasis de Bou Saada", connue de ses palmeraies et ses plaines cultivées, irriguées à partir de la nappe phréatique ainsi que les oueds de Maïter et Bou Saâda.

La ville en pleine évolution spatiale, n'a pas répondu à un plan spécifique dans son tracé, bien au contraire elle a connu plusieurs plans, à savoir : le plan linéaire, le plan en damier, le plan radioconcentrique. Son tissu urbain se structure autour de plusieurs axes qui sont principalement des axes routiers importants, le long desquels se répartissent les logements et les différents équipements (administratifs, scolaires etc....)

- L'axe Bou Saada –Alger sur la RN08 : il structure la ville de Bou Saada, notamment dans la partie Nord-Ouest, le long duquel s'allonge le pôle urbain (la ZHUN), qui contient certains équipements structurants.
- Axe Bou Saada-Biskra (RN46) : c'est un axe structurant la partie Sud-Est le long duquel se localise la zone d'activité, ainsi que certains équipements.
- Axe Bou Saada-Djelfa : représenté par la RN 46 qui traverse la structure du Nord-Est vers le Sud-ouest.

D'autres éléments naturels et technologiques ont contribué à la restriction de la forme actuelle du tissu bâti de la ville et ont orienté son extension, il s'agit de :

- Les Oueds : Oued Bou Saada et notamment oued Maiter
- Les terrains sableux sur les rives d'oued Maiter, situé sur le côté Ouest et côté Nord-est de la ville.

II.3 LE RELIEF

Les reliefs de la région d'étude sont caractérisés par la présence de chaînes de montagne d'orientation variée surtout au niveau de la partie Sud et Sud-ouest.

Les reliefs existants :

- Djebel Baten (Gorehor) au Nord-Ouest de la ville (1029m).
- Djebel Moubakhra au Sud-Ouest du chef-lieu (1052m).
- Djebel Kerdada (947 m).
- Mont de Menkeb Sidi Brahim (718 m) à l'Est de la ville
- et Djebel El Maalleg au Sud de la commune (1343m).

Les terres agricoles du côté Nord-est (village agricole d'El Maadher).

Les vallées Traversant le périmètre de Bou Saada :

La vallée de l'oued Bou Saada qui forme une sorte de couloir entre le Djebel Moubakhera et Djebel Kerdada et coule au pied de ce dernier en se jetant dans la plaine Nord.

La vallée de l'Oued Maiter située à l'Ouest de la ville de Bou Saada avec une altitude de 587m à la limite Ouest de la commune et 547 m sur la RN 8, formant un couloir venteux animé par les vents Ouest et Nord, engendrant des champs de Dunes orientés Ouest-Sud-ouest / Est-Nord-est. Les formes récentes ne sont généralement pas stabilisées, ce sont parfois des dunes au pied des reliefs comme celui du Djebel Kerdada. Sur la rive Est de l'Oued MAITER on trouve des champs de Sebkhass où les larges lits de l'Oued sont souvent à sec et sont soumis à la déflation des vents de l'Ouest.

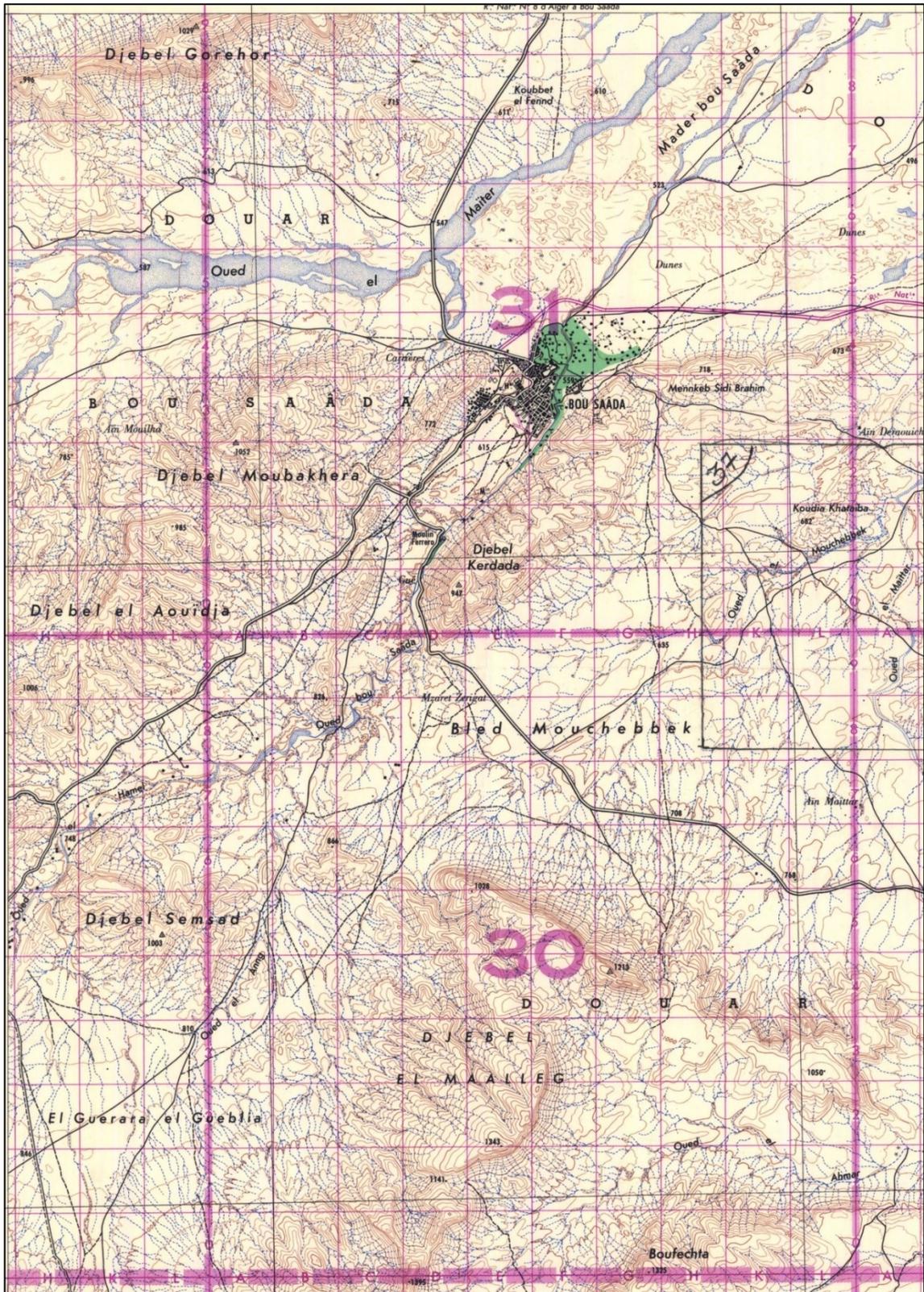


Figure II.2 : Les grands ensembles du relief

II.4 ASPECT CLIMATOLOGIQUE

Le climat de Bou Saada est de type semi-aride, avec un été sec et très chaud et un hiver très froid. Les aléas du climat sont, la désertification et une pluviométrie faible et irrégulière et inégalement répartie.

II.4.1 Les températures

Les températures sont élevées avec des amplitudes thermiques journalières et annuelles très élevées. La température maximale moyenne mensuelle est de 14°C au mois de janvier et de 40°C au mois de juillet. Le minima est respectivement de 2°C et 24°C.

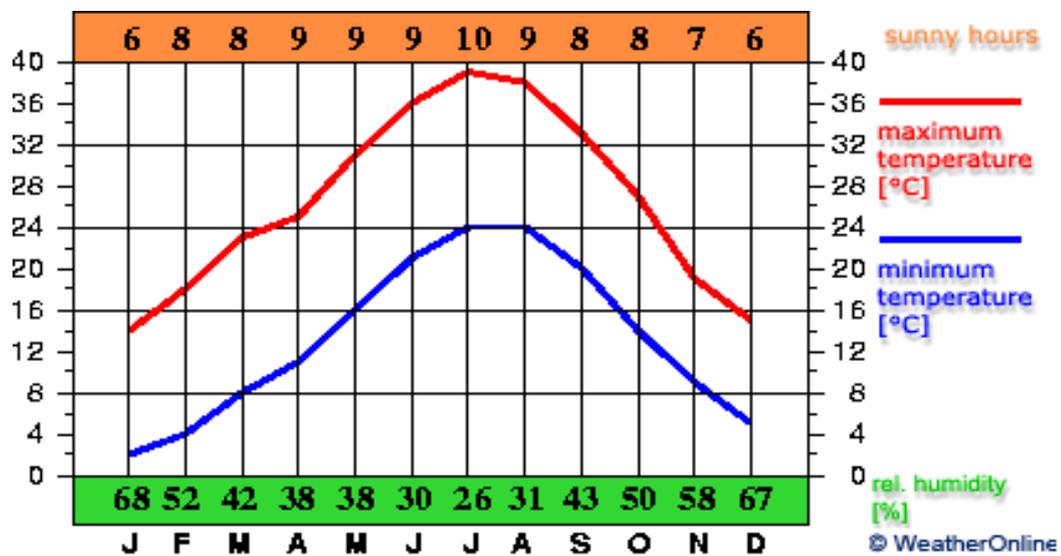


Figure II.3 : Moyenne mensuelle des températures minimales et maximales à Bou Saada

II.4.2 Les Précipitations

La représentation graphique des variations des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations, sur une période de 30 ans (1985-2015), montre une variation irrégulière ; les fortes valeurs sont enregistrées au niveau des mois de septembre et mai (les mois les plus pluvieux), alors que les faibles valeurs caractérisent les mois de Juillet et Août (les mois les plus secs). Les précipitations moyennes annuelles sont de 286mm.

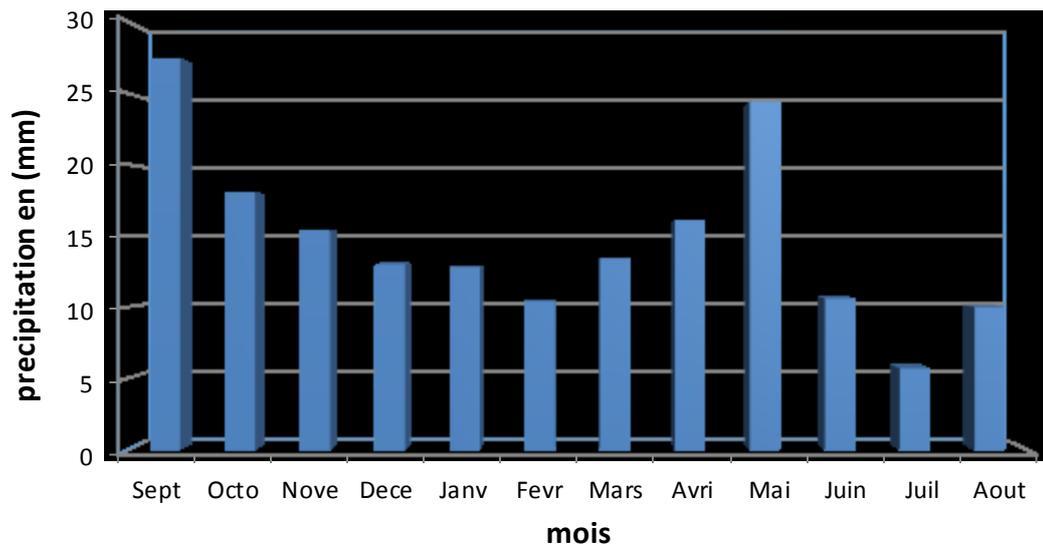


Figure II.4 : Précipitations moyennes mensuelles interannuelles au niveau d'oued Bou Saâda (1985-2015).

II.5 APERÇU GEOLOGIQUE

L'Atlas saharien a subi au cours des périodes géologiques, une tectonique compressive due au coulisement de la plaque tectonique africaine avec l'Euroasiatique ; Les plis, vastes anticlinaux généralement coffrés et faillés ont une direction générale de NE-SW.

La limite méridionale de l'Atlas saharien est constituée par la flexure Sud Atlasique formée de faille dont le rejet peut être supérieur à 2000m, et d'où la résultante est un accident symétrique à la flexure Sud atlasique bordière à l'atlas saharien au Nord.

Durant le Secondaire, des mouvements lents ont causé des alternances de transgression et de régression. La phase moyenne de plissement d'âge Eocène a entamé l'érosion définitive de tous l'Atlas saharien.

Les terrains de Boussaâda se situent sur l'Atlas saharien qui est limité par ces deux flexures.

II.5.1 Description lithostratigraphique

La géologie de Bou Saâda est caractérisée par des affleurements massifs du crétacé. Cette période est subdivisée en série des âges géologiques correspondants à des lithologies indépendantes dont les environnements de dépôt sont différents.

Le Néocomien : Il est caractérisé par des barres massives de dolomies.

Le Barrémo-Aptien inférieur : C'est une série (1000 m) d'alternances de dépôts différents, sa base est repérée par un banc décimétrique de calcaire oolitique, il se termine par des marnes vertes riches en gastéropodes et coquilles d'huîtres.

L'Aptien supérieur : Sa base est représentée par une dalle de calcaire à orbitholines, il se termine par les premiers indices de grès de l'Albien inférieur.

L'Albien inférieur : Il est caractérisé par des barres massives de grès sous forme des chenaux.

L'Albien supérieur : Il est caractérisé par deux méga-séquences stratocroissantes de calcaire à strombes.

Le Cénomanién : Il est à dominance marneuse avec la présence du silex.

Le Turonien : Il est représenté par des barres métriques de calcaire subrécifal.

L'Atlas saharien est connu par ces différents affleurements en particulier la région de Bou-Saâda qui est connu par l'affleurement du Crétacé et ces différents étages.

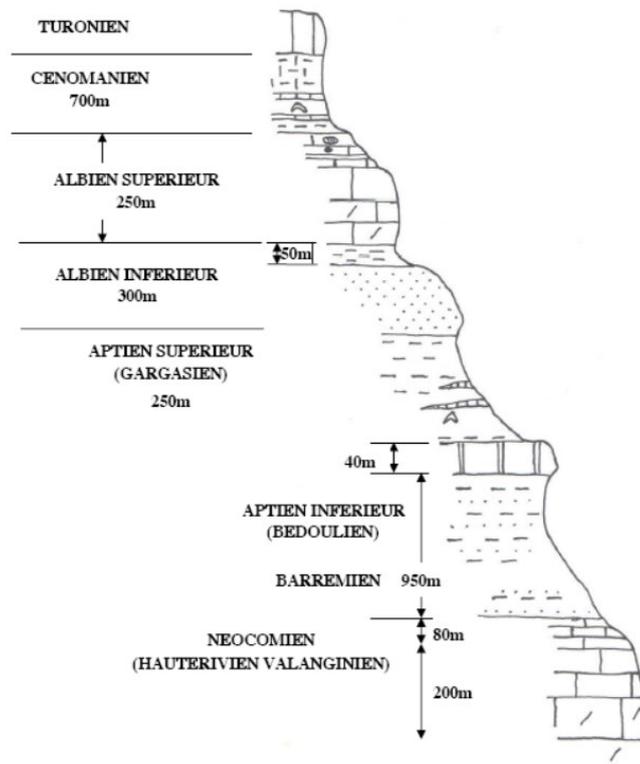


Figure II.5 : Colonne stratigraphique simplifiée des terrains Secondaires de la région de Bou-Saâda [10]

II.5.1.1 Le Néocomien

Rencontré à djebel Kerdada au côté sud de la ville de Bou Saâda, il est constitué d'une série de bancs massifs métriques et strato-décroissants de calcaire dolomitique à aspect d'une peau d'éléphant, de couleur foncée ; marron noirâtre à la patine, grise à la cassure, dégageant une odeur fétide à la réaction avec l'HCl après réchauffement, d'épaisseur de 200 m, intercalés par des inter-bancs centimétriques de marnes ou d'argiles.

II.5.1.2 Le Barrémo-Aptien inférieur

Cet étage est caractérisé par la série des alternances de Bou Sâada, qui s'étend du flanc nord de Djebel Kerdada jusqu'à la barre calcaire à Orbitoline au nord de la ville en traversant Oued Bou Sâada, et la ville elle-même construite sur ce terrain d'alternance de Barrémo-Aptien inférieur.

La série des alternances d'une épaisseur d'ordre de 1000 m, présente un faciès très varié allant d'une barre décimétrique de calcaire oolitique de 80m environ, qui marquent le début du Barrémo-aptien inférieur. En majeure partie, on peut citer ce qui a été distinct :

- Des stratifications de grès en oblique surmontés par des alluvions et conglomérats du Tertiaire et/ou Quaternaire.
- Des calcaires bioclastiques dures (métriques), très riches en débris de coquilles, lamellibranches et gastéropodes avec inter bancs tendres, marneux (décimétriques).
- Alternance métrique entre les grés, sous forme de diaclases et argiles tendres vertes.
- Calcaires noduleux surmontés par des calcaires bioclastiques contenant des débris d'huîtres et traces organiques.
- Calcaires marneux à terriers (lithophages).
- Calcaires à gastéropodes

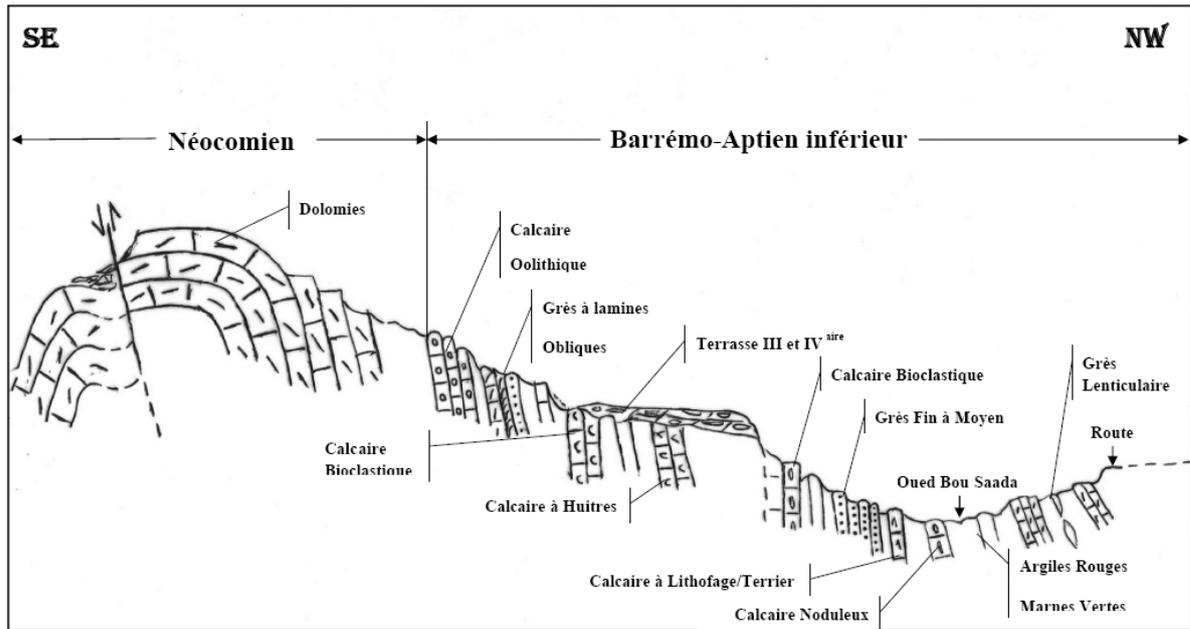


Figure II.6 : Coupe géologique de Djebel Kerdada [10].

II.5.1.3 L'Aptien supérieur

La limite entre l'Aptien inférieur et l'Aptien supérieur est marquée par la disparition des formations gréseuses et la présence de barres calcaires fossilifères à orbitolines sous forme de cuesta subhorizontale (N120°-15°SSW) d'une épaisseur de 40 m à la base de djebel Dahla et Djebel Freytas.

Djebel Louiza qui se situe dans la région d'Eddis où l'affleurement de dépôts d'âge Aptien supérieur constitués des marnes vertes est très accessible. Cette série marque la fin d'Aptien supérieur, elle s'étend du Djebel Dahla jusqu'aux pieds du Djebel Louiza et Djebel Âraar. Ces formations marneuses riches en orbitolines et échinodermes sont d'épaisseur métrique, parfois intercalée de quelques bancs de calcaires marneux.

II.5.1.4 L'Albien inférieur

Au sommet de l'Aptien supérieur, une zone de transition marquée par des grès calcaires indique le début de l'Albien inférieur. Ainsi, les grès (grès de Louiza) dominent tout au long

de cet âge sous forme de barre à ciment grès ferrugineux (sidérites), grès argileux, grès à remplissage de barytine au niveau des creux.



Figure II.7 : Grès de l’Albien inférieur

II.5.1.5 L’Albien supérieur

La zone qui transite entre l’Albien inférieur et l’Albien supérieur, est marquée par la présence de marnes à huîtres et à degrés moindre, des argiles rouges. Cet étage est caractérisé par la présence de barres massives de type calcaire noduleux riche en strombus, Ils ont la forme d’un gastropode mais de taille plus importante, intercalés avec des marnes à huîtres et gastéropodes. Des calcaires bioclastiques d’une épaisseur d’environ 250m, marquent la fin de cet âge, qu’on a rencontré au sommet de djebel Araar ainsi que Djebel Louiza et Aouidja.

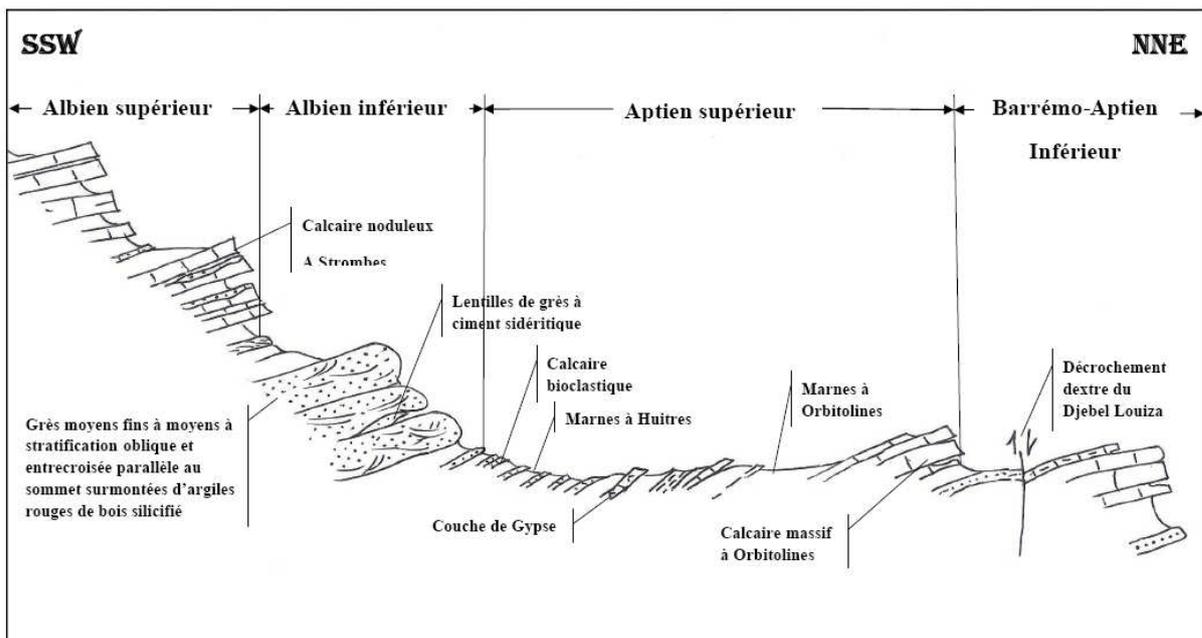


Figure II.8 : Coupe géologique de Djebel Araar, plis monoclinal [10].

II.5.1.6 Le Cénomanién

Après la transgression albienne, la mer s'est stabilisée puis s'est retirée, ce qui a donné une sédimentation évaporitique annonçant le début du Cénomanién. Il est suivi d'une alternance de marnes lumachelliennes riches en huîtres brachiopodes, gastéropodes et lamelli-branches. Différents types de calcaires apparaissent tels que les calcaires brèchoïdes, calcaires à silex qui sont d'ailleurs un repère majeur du Cénomanién, calcaires nodulaires bioclastiques.

La fin de l'étage se termine par des marnes vertes gypsifères cristallisés à aspect de flèches. Toutes ces séries sont reconnues au niveau de djebel El Hamel d'une épaisseur totale de 700m.

II.5.1.7 Le Turonien

La base du Turonien commence dès l'apparition des premiers bancs calcaireux rencontrés à djebel El Hamel qui recouvrent les marnes du Cénomanién. Des intercalations décimétriques du calcaire marneux riche en polypiers, ce qui lui permet d'être une roche réservoir de bonne qualité mais ces intercalations sont de plus en plus intercalés par la stratocroissance des calcaires subrécifaux de couleur jaune ocre, grise à la patine, réagissent bien avec l'HCl, allant jusqu'aux dizaines de mètres d'épaisseur.

Ces calcaires marneux fossilifères à gastéropodes et des polypiers marquent une nouvelle phase de transgression.



Figure II.9 : Calcaires marneux.

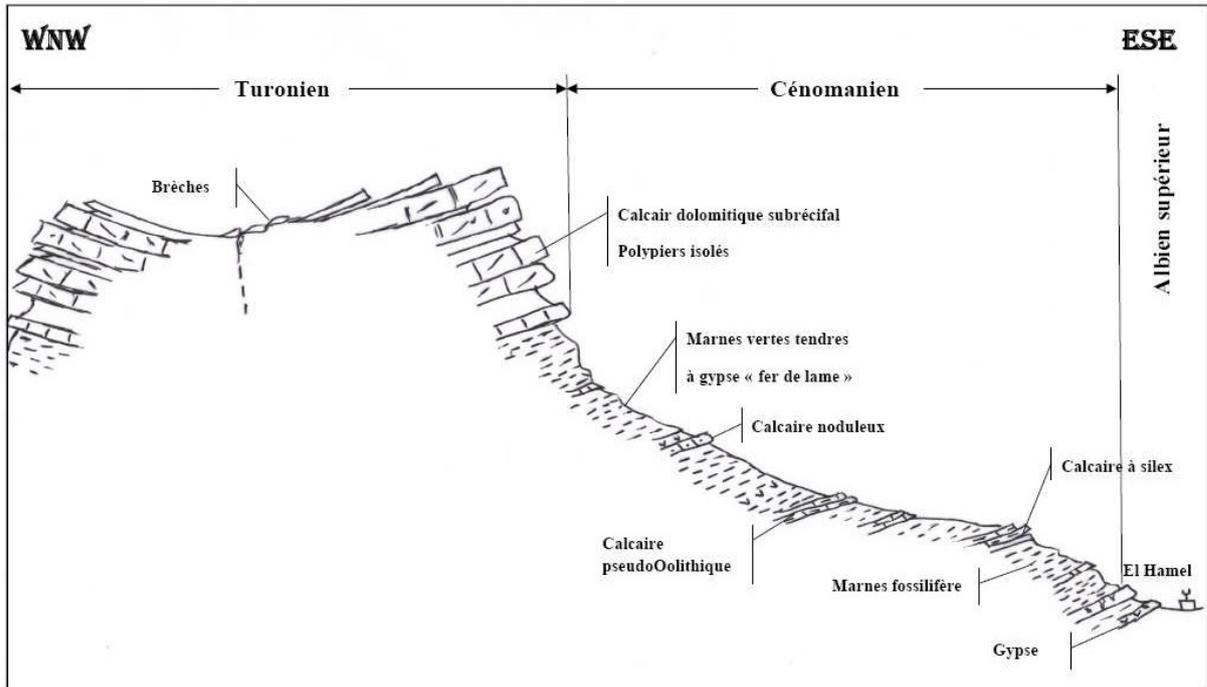


Figure II.10 : Coupe géologique de Djebel El Hamel, synclinal perché [10].

II.5.1.8 *Le tertiaire continental*

Le Miocène affleure largement dans les parties Est de la région de Bou Saada, il est largement transgressif sur le Crétacé. Le Miocène est divisé en trois cycles. Les deux premiers sont marins et marneux [mi]. Le 3^{ème} cycle est formé de : a) marnes, b) conglomérats et grès, c) « Miocène continental » ou « Pontien » [mc], ou encore [mp] constitué de conglomérats gréseux peu consolidés, qui atteint jusqu'à 250m d'épaisseur.

Le Pliocène peut se confondre avec cette formation, mais il est souvent formé par des séries brun rougeâtres qui surmontent les précédentes dans les forages : marnes et grès sableux ou marneux à lentilles de galets.

II.5.1.9 *Quaternaire*

Le quaternaire est formé par de alluvions récents et des formations dunaires localisées dans la cuvette des oueds TAMSA et MAITER, des sables souvent chargés en matière argileuse, ils proviennent de l'érosion des grès; limons sableux et niveaux grossiers à galets en périphérie des formations pontiennes

SONDAGE VSA MAADER
 Carte: AIN DISS 1/50 000
 Date des travaux : Long : X 6 4 1.60
 Echelle de la coupe : Lat : Y 2 2 1.300

N: Fichier Forages 262/22
 N: INVENT

Profondeurs et cotes	Tubages et Cimentation	Plans d'eau	Echant.	Coupe	DESCRIPTION GÉOLOGIQUE
0	Forage 24" T. GUIDE Cimenté lon. à 10 m	φ 20"			SABLES FINS
10					GALETS GRAVIERS (CALCAIRE DOLOMITIQUE)
20	Forage φ 17 1/2	40			CONGLOMERATS, GALETS, GRAVI
30					CONGLOMERATS GRAVIERS ARGILE
40					CONGLOMERATS ARGILE
50					CONGLOMERATS
60					ARGILE MARNE CONGLOMERAT
70					MARNES ARGILES
80					MARNES
90					MARNES GRESEUSES ET GALETS
100					GALETS AVEC MARNES
110					ARGILE AVEC GRAVIERS
120	Forage φ 12 1/2	120 126 138 162			GRES AVEC ARGILE
130					GRES AVEC CONGLOMERATS
140					GRES FISSURES
150					GRES ET ARGILE
160					GRES CONGLOMERATS
170					GRES MARNES GALETS
180					MARNES
190					
200					
210					
220					

Figure 11 : Log stratigraphique du forage d'El Maader

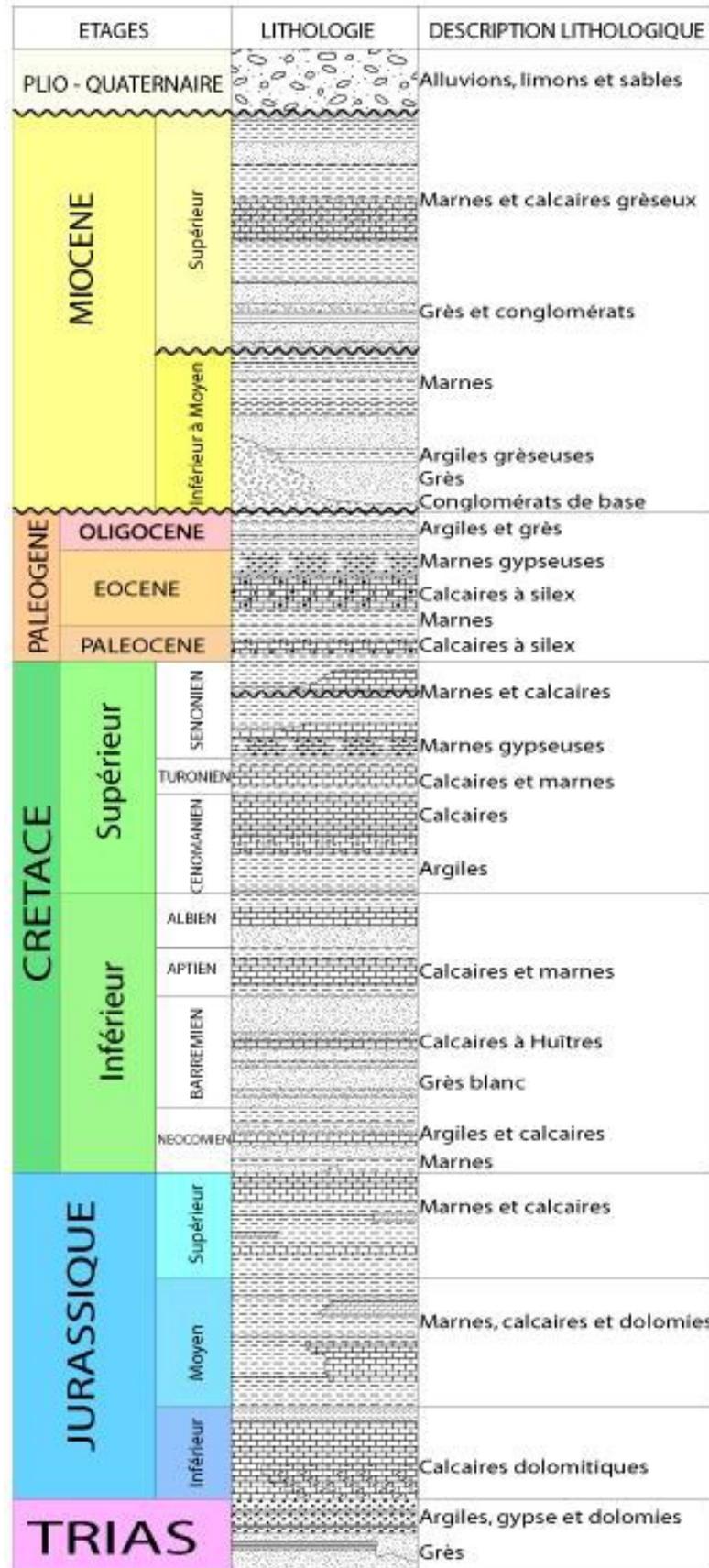


Figure II.12 : Colonne stratigraphique synthétique du Bassin du Chott El-Hodna [11].

II.5.2 Aspect Structural

II.5.2.1 Dôme Triasique

Mzaret Zerigat, limitée au Nord par Oued Bou Saâda, à l'Est par djebel Kerdada et au Sud par djebel Maâlag, existe une zone de forme circulaire de couleur violâtre. Cette zone de broyage contient des argiles versicolores, des marno-calcaires bréchiques mal stratifiés, des affleurements de gypses et lambeaux de roches de différentes origines. Tous ces éléments proviennent des différentes couches traversés par les sels du Trias au moment de sa remontée en surface, toujours en cours de mouvement suite aux terminaisons broussées des couches périphériques.



Figure II.13 : Dôme Triasique de « Zerigat »

II.5.2.2 Accident Nord Atlasique

C'est un grand événement tectonique décrochant affectant tout le nord-africain, cette faille est engendrée par le mouvement pivotant du continent africain par rapport à l'Eurasie.

L'impact de cette grande faille est bien remarqué dans la carrière de "Menkeb Sidi Brahim", situé vers l'Est de Bou Saâda au bord de la route de Biskra où on remarque l'existence d'un miroir de faille contenant des stries sous l'action du déplacement d'un compartiment par rapport à l'autre et une zone de broyage très importante, où on trouve un amas mélangé de tout type de sédiments (argile, grès, marnes, dolomies...etc.).

La dalle calcaire à Orbitolines qui devraient être plus haut, vient se mettre contre les dolomies de néocomien, ce qui donne un rejet de faille très important.

L'accident Nord atlasique est la limite structurale entre l'Atlas Saharien au sud, et les bassins des haut plateaux caractérisés par une géologie d'une lithostratigraphie subhorizontale couverte par les dépôts du Quaternaire ce qui est différent pour l'Atlas Saharien qui prend un caractère de la phase atlasique.

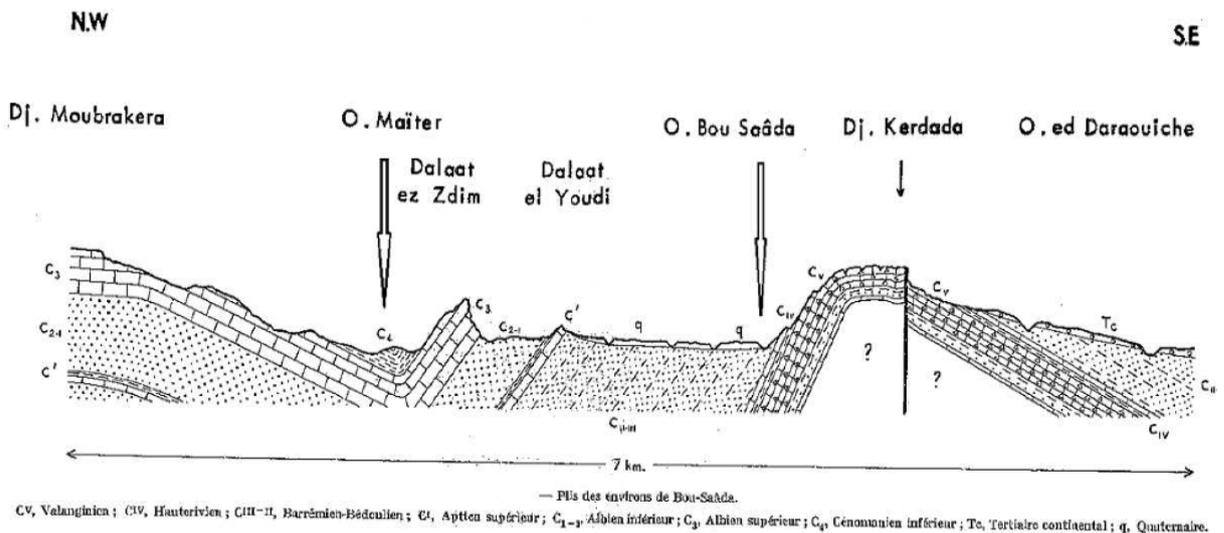


Figure II.14 : Coupe géologique de la zone de Bou Saâda [12]

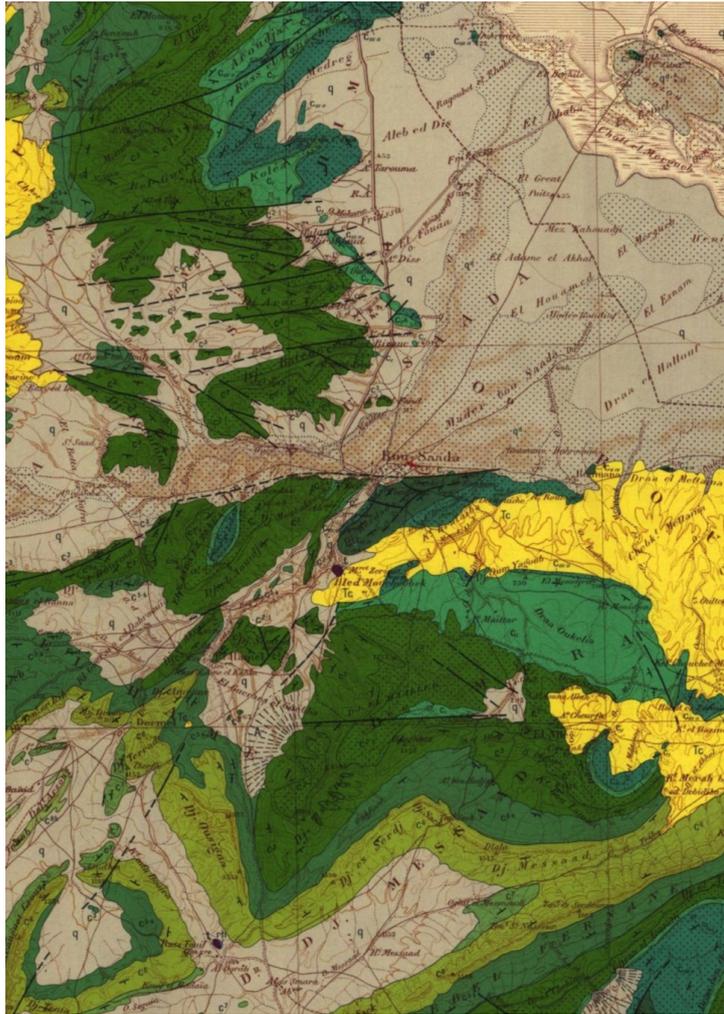


Figure II.15 : Carte géologique de la région d'étude (extrait de la carte géologique de Bou Saada)

II.6 CONCLUSION

Le bassin versant du Hodna se trouve fortement marqué par un climat à tendance aride mis en évidence par la faiblesse des précipitations. La chaîne montagneuse du Hodna forme une barrière face aux perturbations venant du nord. Cette situation est souvent aggravée par une évaporation élevée et une faible couverture végétale favorisant le travail de l'érosion.

Dans cette cuvette à matériaux par endroits argileux et/ou marneux, alternant avec des grès (Miocène) et par d'autres crétacé à grès et carbonates au sud, les différents cours d'eau ont déposés un matériel alluvionnaire à sables, graviers et galets limoneux avec des lentilles purement marneuses ou argileuses et ce, dès le Mio-Pliocène jusqu'au Quaternaire.

Chapitre III

Etude hydrologique

III.1 INTRODUCTION

La cuvette du Hodna, d'une superficie de 8 500 km², qui sert de niveau de base aux oueds du bassin, occupe en son milieu de bas fond-plat une superficie de 1 100 km², c'est cela que l'on appelle «le Chott El-Hodna».

Surface d'épandage des crues, le Chott a une forme elliptique, une eau salée et s'étend sur 77 Km de long et 19 km de large. Son alimentation est assurée par au moins 22 cours d'eau principaux auxquels il faut ajouter des sources d'eau douce. Il se met en eau uniquement en hiver, sec et salé en été, des croûtes de sel couvrent toute son étendue [13].



Figure III.1 : Les sous bassins versants de Chott El-Hodna.

III.2 LES BASSINS VERSANTS DE BOU SAADA

Le secteur d'étude appartient aux bassins versants N°16, N°17 et N°18 du grand bassin versant de Chott El Hodna (N 05). Il est drainé par un réseau hydrographique assez dense. Parmi les principaux oueds oued Bou Saada, Oued Maiter et oued Mouchabek.

Le ressaut hydrographique est en général représenté par des cours d'eau ayant un écoulement temporaire (en période de crues).

La seule station hydrologique de la région est celle de Moulin Ferrero qui a été installée par l'A.N.R.H. sur l'oued Bou Saada en 1970. Celle-ci a cessé de fonctionner en 1978. Elle contrôlait un bassin versant de 1 020 km².

III.2.1 Réseau Hydrographique

Le réseau hydrographique de oued Maiter prend sa source dans les monts du Djebel Bou Denzir dont le sommet culminant est à la cote 1416m NGA.

Par contre, oued Bou Saada prend naissance dans les monts de Ain ghorab dont la cote se trouve à 1500m NGA.

Les précipitations importantes sur les hauteurs multiplient les possibilités des crues qui passent à l'aval par la plaine d'EL MAADHER provoquant ainsi une importante érosion des berges de Oued Bou Saada en consommant d'importantes terres irriguées et irrigables qui nécessitent des mesures de protection immédiates [15].

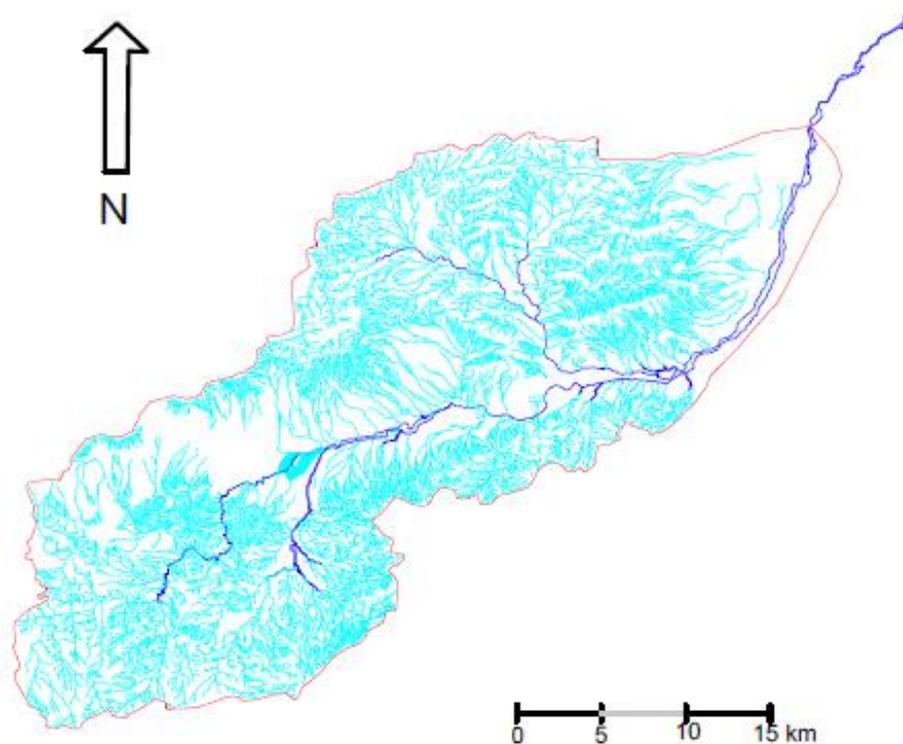


Figure III.2 : Carte de réseau hydrographique de l'oued Maiter

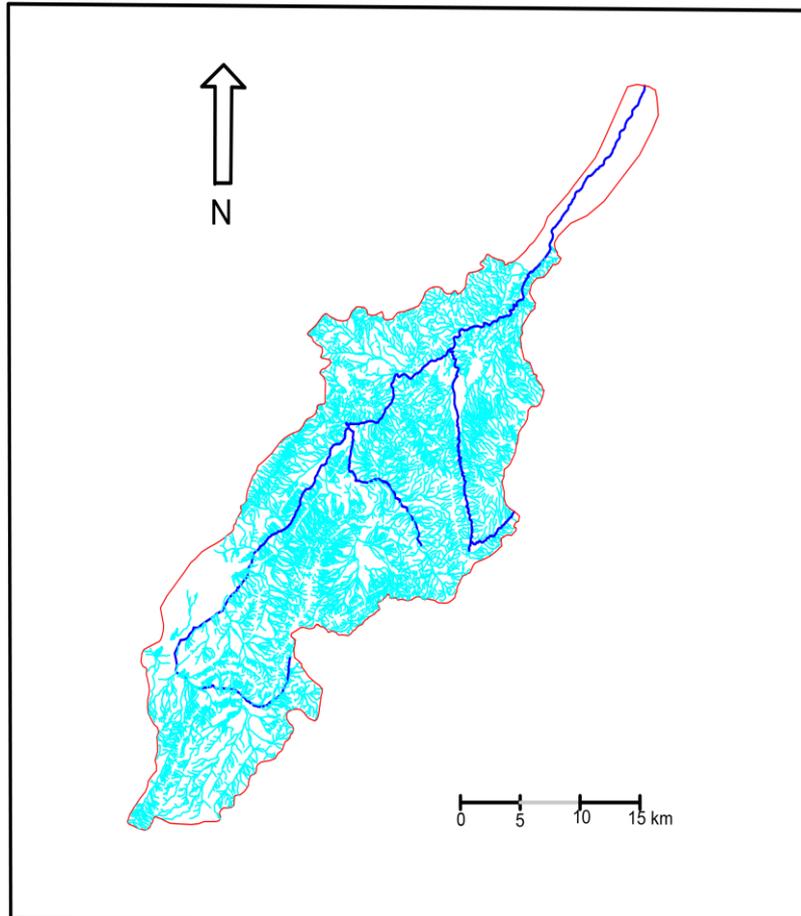


Figure III.3 : Carte de réseau hydrographique de l'oued Bou Saada

III.2.2 Caractéristiques morphologiques des bassins versants

III.2.2.1 Surface

La surface du bassin versant de oued Bou Saada a été mesurée grâce au logiciel AUTOCAD, celle-ci est de l'ordre de **705 km²**. Celle du bassin versant de oued Maiter est de **858 km²**.

Ce sont des valeurs inférieures à celles mentionnées dans les différentes études des bassins versants d'El Hodna. Nous pensons que cette différence provient du fait qu'il existe sur ces deux bassins des sous-bassins endoréiques dont l'écoulement ne participe pas à l'écoulement général des oueds. Ceci nous a amené à soustraire les surfaces de ces sous-bassins de la surface totale.

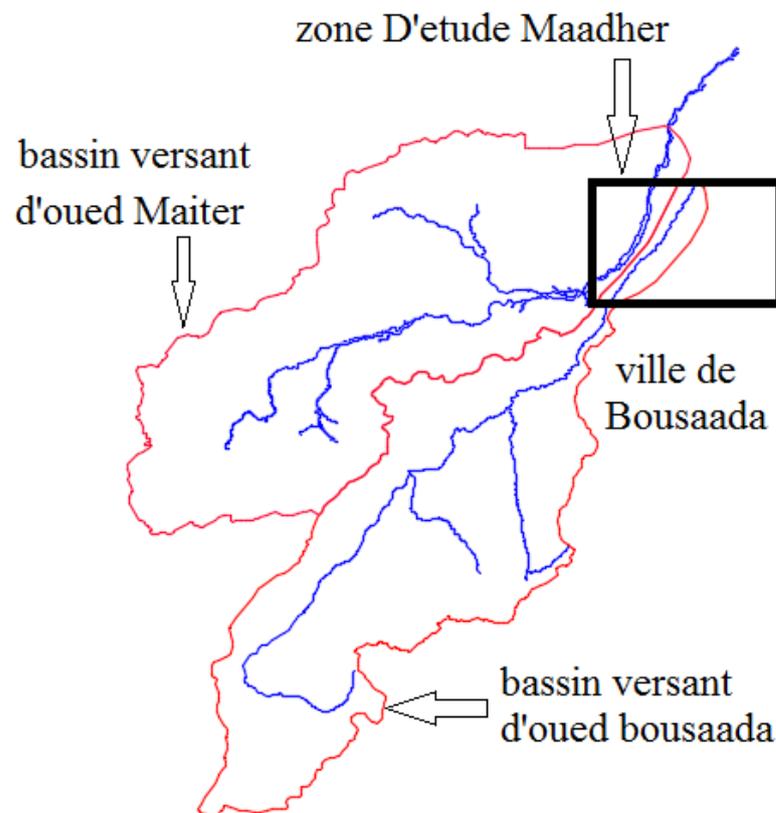


Figure III.4 : Carte des bassins versants étudiés

III.2.2.2 Périmètre

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Il n'influence pas l'état d'écoulement du cours d'eau au niveau du bassin versant. Le périmètre peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels cités précédemment.

Le périmètre du B.V de Bou Saada mesuré par "AUTOCAD" est de **186,6 km**. Celui du B.V du Maiter mesuré par "AUTOCAD" est de **156 km**.

III.2.2.3 Indice de compacité de Gravelius

L'indice de compacité (K_C) renseigne sur la forme du bassin versant qui a une grande influence sur l'écoulement global du cours d'eau et surtout sur l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin, résultant d'une pluie donnée. Il est établi en comparant le périmètre du

bassin à celui d'un cercle qui aurait la même surface. Il s'exprime par la formule suivante (ROCHE, 1963) :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

avec :

K_G : Indice de compacité de Gravelius

P : Périmètre stylisé en km du bassin versant

A : Superficie du bassin versant en km².

- Lorsque K_G est proche de 1 le bassin versant est de forme quasiment circulaire
- Lorsque le K_G est supérieur à 1, le bassin versant est de forme allongée.
- Un bassin versant circulaire est mieux drainé qu'un bassin allongé.

Pour le bassin d'oued Bou Saada l'indice de compacité de Gravelius $K_G=1,968$

Pour le bassin d'oued Maiter, l'indice K_G est de 1,519

D'après K_G obtenu, les bassins versants d'oued Bou Saada est de oued Maiter sont de formes allongées.

III.2.2.4 Longueur du cours d'eau principal

La longueur du cours d'eau principal est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé. Lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant, cette distance parcourue est exprimée en km. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface.

La longueur du cours d'eau du bassin versant de Bou Saada (oued Bou Saada) mesurée par "AUTOCAD" est de **81,4 km**. Pour oued Maiter la longueur est plus petite, elle est de **62,8km**.

III.3 DETERMINATION DES DEBITS DE CRUES

Les crues sont les événements correspondant à la circulation des débits exceptionnels dans les bassins versants, elles sont influencées par de nombreuses variables, parmi lesquelles on cite l'intensité, la durée et la distribution de la pluie dans le bassin ainsi que sa topographie etc.

Les débits des crues ont une influence directe sur le régime hydrologique, particulièrement en Algérie, où les oueds, à cause de la grande irrégularité, passant de débits nuls à des débits de crues exceptionnels.

Les crues dépendent essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie, de plus, le rôle physique du bassin versant n'est pas négligeable.

De ce fait, l'évolution de la crue obéit principalement à la puissance et l'intensité de l'averse, sa vitesse est largement influencée par le couvert végétal, la lithologie, les paramètres morphométriques du bassin (indice de compacité, densité de drainage, rapport des confluences et des longueurs, etc...), par la pente des thalwegs. La forme du lit, la largeur de la vallée. De plus, les diverses branches du chevelu hydrographique interviennent bien qu'à un degré moindre dans l'évolution ou la perturbation d'une crue.

Les techniques utilisées pour la détermination des crues dépendent pour une grande part des données disponibles.

Presque chaque problème qui se produit est dû aux variations des conditions et des données qui font que c'est la disponibilité des données plutôt que la nature des problèmes qui conditionnent la procédure.

Il existe de nombreuses méthodes empiriques pour l'estimation des crues, leur étude détaillée permet une vue d'ensemble du développement historique de l'hydrologie. Les traités d'hydrologies donnent les formules les plus souvent utilisées et leurs domaines d'application. D'une façon générale, les formules empiriques s'appuient surtout sur des informations d'ordre général qui ressortent de la comparaison d'un grand nombre de bassins versants.

L'absence d'observations hydrométrique de longue durée sur beaucoup de petits cours d'eau a suscité l'établissement de très nombreuses formules pour le calcul du débit maximum de la crue probable. Ces formules sont basées sur l'expérimentation ou sur certaines informations propres à certains régions pour les quelles ont été déterminées. Ces formules empiriques sont

à prendre avec précaution dans le sens ou si elles sont valables dans une région, elles ne le sont pas dans l'autre et donnent souvent des valeurs sous-estimées ou surestimées.

Les débits donnés par ces formules tiennent compte essentielles de la (superficie, de la pluviométrie, de la fréquence des crues.....etc.) du bassin considéré.

Cette partie hydrologique a pour but de déterminer les débits de crues de projet aux différentes fréquences de l'oued Bou Saâda fournissant les données de base pour le dimensionnement des ouvrages.

III.3.1 Données disponibles

III.3.1.1 Données hydrométriques

Depuis 1970, il existe une station limnimétrique sur oued Bou Saada en amont de la ville (05-17-01). Les données fournies par cette station dans la période d'observation sont les suivantes :

Tableau III.1 : Données des apports de la station de Moulin Ferrero

	70 /71	71/72	72/73	73/74	74/75	75/76	76/77	77/78
Minimum instantané m ³ /s	0,108	0,080	0,092	0,075	0,075	0,030	0,092	0,060
Maximum instantané m ³ /s	4,579	7,54	10,10	0,142	9,559	51,90	1,030	0,342
Moyen m ³ /s	0,1613	0,2198	0,2125	0,1103	0,1952	0,3939	0,1525	0,1062
Apport annuel Hm ³	5,088	6,952	6,70	3,479	6,157	12,46	4,809	3,349

III.3.1.2 Données pluviométriques

Dans le bassin versant de l'oued Bou Saâda il existe une seule station pluviométrique. Ses caractéristiques sont les suivantes :

Tableau III.2 : Caractéristiques du bassin versant de oued Bou Saada

Code de poste	Nom de pluviométrique	Coordonnées en degré	Altitude (m)	P (mm)	P _{24h} (mm)	C _v	b	N
05-17-01	Bou Saada	4°11'18 35°17'37	550	262	36	0,78	0.28	51

Où :

\bar{P} = Pluie moyenne annuelle

P_{24h} = moyenne des pluies de 24 heures max

C_v = coefficient de variation

b = exposant climatique

N = nombre des années observées

Pour avoir la moyenne des caractéristiques pluviométriques sur l'ensemble du bassin versant, les cartes pluviométriques élaborées par l'A.N.R.H. 1 :500.000^{ème} /en 1980 ont été utilisées.

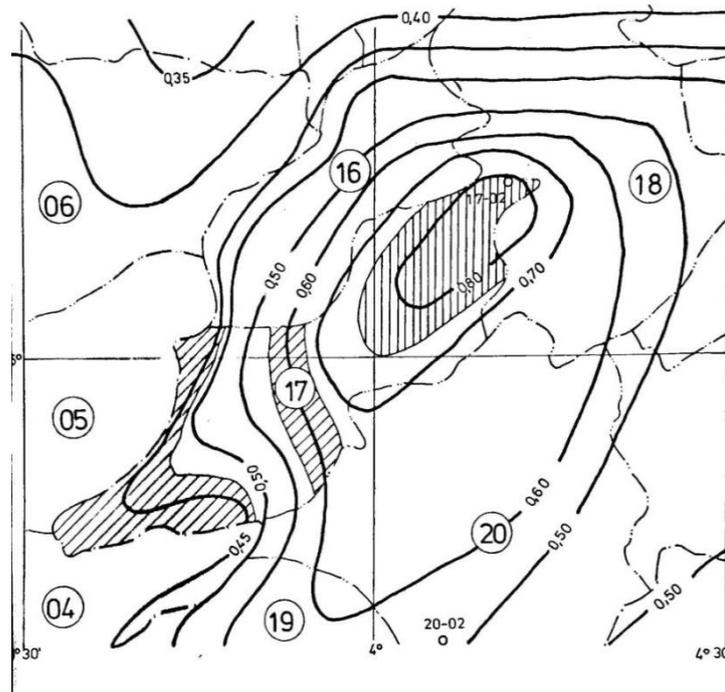


Figure III.5 : Carte de répartition du coefficient de variation de la pluviosité de Bou Saâda (Selon Body)

Selon ces cartes le coefficient de variation sera :

Tableau III.3 : Valeurs du coefficient de variation

Cv	0,45	0,50	0,60	0,70	0,80
S_{km}²	213	247	98	211	263

$$C_{vmoy} = \frac{213 * 0,45 + 247 * 0,5 + 98 * 0,6 + 211 * 0,7 + 263 * 0,8}{1032} = 0,61165 \approx 0,62$$

$C_v = 0,62$ et l'exposant climatique : $b = 0,25$

III.3.1.2.1 Pluviométrie annuelle

La pluie moyenne interannuelle est égale à 262 mm pour la station de Bou Saada.

Etant donné que la carte pluviométrique de l'Algérie donne pour ce bassin versant une valeur entre 200 et 300 mm, nous acceptons la valeur de Bou Saada pour l'ensemble du bassin versant.

Soit : $P = 262$ mm

La lame d'eau écoulée était calculée à partir de la formule de SAMIE :

$$Le = \bar{P}^2 (293 - 2,2\sqrt{9}) = 15,3 \text{ mm}$$

III.3.1.2.2 Pluviométrie de 24 heures

La pluie de 24 heures de différentes fréquences a été calculée avec deux méthodes.

a) Méthode de GALTON

La formule utilisée :

$$P_{24h} \% = \frac{\bar{P}_{24h}}{\sqrt{C_v^2 + 1}} e^{u \sqrt{\ln(C_v^2 + 1)}}$$

Où :

$P_{24h} \% =$ pluie de 24 heures de fréquence %

$\bar{P}_{24h} =$ pluie de 24 heures moyenne max.

Cv = coefficient de variation

u = variable aléatoire de la répartition GAUSSIENNE

Tableau III.4 : Variables de Gauss

%	Période de retour (années)	Variable de GAUS (u)
0,1	1000	3,09023
0,5	500	2,57583
1	100	2,32635
3	33	1,88079
4	25	1,75069
10	10	1,28155

Les résultats sont les suivants :

Tableau III.5 : Pluies de 24 heures

Méthode de Galton	N	P ₂₄	Cv	P _{24h} %					
				0,1	0,5	1	3	4	10
	51	36	0,62	178,27	132,95	115,31	89,44	83,04	63,55

b) Méthode de GAMBEL

La formule utilisée :

$$P_{24h} \% = \bar{P}_{24h} + K C_v \bar{P}_{24h}$$

Où :

$$K = - \frac{\ln * \ln \frac{T}{T-1} + \bar{a}}{S_a}$$

Où :

T = période de retour (années)

$$\bar{a} = - \left(\frac{1}{N} \right)_{i=1}^N a_i$$

ou l'on désigne par 'N' le nombre des observations /ans et

$$a_i = - \ln * \ln \frac{N+1}{N+1-i}$$

$$S_a = \sqrt{\frac{N \sum a_i^2 - (\sum a_i)^2}{N(N-1)}}$$

Les résultats obtenus sont :

Tableau III.6 : Les précipitations journalières

%	P _{24h} % (mm)					
	0,1	0,5	1	3	4	10
	156,9	143,7	113,0	91,8	86,4	68,4

III.3.1.2.3 Pluie de courte durée

La pluie de durée inférieure à 24 heures était calculée en se basant sur les pluies de 24 heures de différentes fréquences obtenues avec la méthode de GALTON (voir figure).

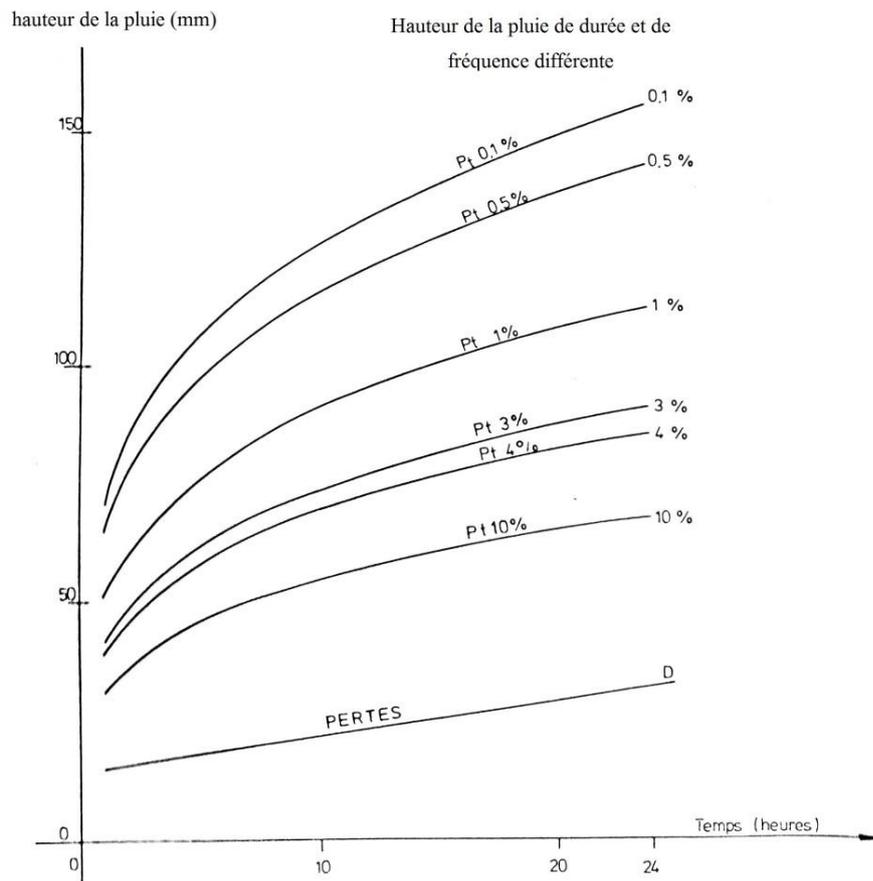


Figure III.6 : Hauteurs de Pluies de durée et de fréquence différentes

En utilisant la formule de MONTANARI nous pouvons avoir les pluies de différentes durées.

$$P_{t\%} = P_{24h\%} \left(\frac{t}{24}\right)^b$$

Où : $b = 0,25$

Tableau III.7 : Pluies de différentes durées

t	P _t %					
	0,1	0,5	1	3	4	10
24	156,9	143,7	113,0	91,7	86,4	68,3
20	149,8	137,2	107,9	87,6	82,5	65,2
15	139,5	127,8	100,5	81,5	76,8	60,7
14,2	137,6	126,0	99,1	80,5	75,8	59,9
12	131,9	120,9	95,0	77,1	72,7	57,4
10	126,0	115,4	90,7	73,6	69,4	54,8
9	122,8	112,5	88,5	71,8	67,7	53,5
8	119,2	109,2	85,9	69,7	65,7	51,9
7	115,3	105,6	83,1	67,4	63,5	50,2
6	110,9	101,6	79,9	64,8	61,1	48,3
5	106,1	97,1	76,4	62,0	58,4	46,2
4	100,3	91,8	72,2	58,6	55,2	43,6
3	93,4	85,5	67,2	54,6	51,4	40,6
2	84,3	77,2	60,7	49,2	46,4	36,7
1	70,9	65,0	51,1	41,4	39,1	30,9

III.4 ÉTUDE DES CRUES

III.4.1 Méthode synthétique

Cette méthode se base sur la transformation hydrologique de l'averse à la crue en tenant compte des paramètres morphologiques du bassin versant. Elle nous permet de calculer directement les débits instantanés de différentes fréquences.

III.4.1.1 Hypothèses de base

Pour établir les hydrogrammes synthétiques, il nous faut adopter les hypothèses de base suivantes :

- l'averse génératrice de la crue se répand uniformément sur le bassin versant
- la vitesse de transfert de la crue est constante
- la fréquence des pluies génératrices correspond à celle des crues provoquées
- la pluie efficace peut être calculée à partir d'une réduction de la pluie brute due à une perte par rétention, infiltration et évaporation.
- le temps de concentration peut être calculé par la formule de GIANDOTTI en utilisant les paramètres morphologiques du bassin versant comme suit :

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5 L}{0,8\sqrt{\bar{H} - H_0}} \quad (\text{heures})$$

Ou :

S = superficie du bassin versant en km².

L = longueur du thalweg principal en km.

\bar{H} = altitude moyenne du bassin versant en m.

H₀ = altitude minimale du bassin versant en m.

Le temps de concentration calculé selon cette formule :

$$T_c = 14,2 \text{ heures}$$

La vitesse moyenne du transfert sera :

$$\bar{V} = \frac{L}{T_c} = 4,79 \text{ km/h} = 1,33 \text{ m/s}$$

III.4.1.2 Pluies efficaces

La pluie efficace (lame d'eau ruisselée pendant la crue) a été estimée à partir des pluies brutes. Pour les pertes, on peut considérer 15 mm dans la première heure et 0,75 mm dans les suivantes.

Dans le tableau suivant nous donnons les résultats de ce calcul.

Tableau III.8 : Pluies efficaces

t	D (mm)	P _{eff} (mm)					
		0,1	0,5	1	3	4	10
24	32,25	124,60	111,45	80,75	59,45	54,15	36,05
20	29,25	120,55	107,95	78,65	58,35	53,25	35,95
15	25,5	114,00	102,3	75,00	56,00	51,30	35,20
14,2	24,9	112,70	101,0	74,20	55,60	50,90	35,00
12	23,25	108,65	97,65	71,75	53,85	49,45	34,15
10	21,75	104,25	93,65	68,95	51,85	47,65	33,05
9	21,0	101,8	91,50	67,50	50,80	46,7	32,5
8	20,25	98,95	88,95	65,65	49,45	45,45	31,65
7	19,5	95,80	86,10	63,60	47,9	44,0	30,70
6	18,75	92,15	82,85	61,15	46,05	42,35	29,55
5	18,0	88,10	79,10	58,4	44,00	40,40	28,20
4	17,25	83,05	74,55	54,95	41,35	37,95	26,35
3	16,5	76,90	69,00	50,70	38,10	34,90	24,10
2	15,75	68,55	61,45	44,95	33,45	30,65	20,95
1	15	55,90	50,00	36,10	26,40	24,10	15,90

L'intensité de la pluie efficace a été calculée selon la relation suivante :

$$I_{eff} \% = \frac{P_{eff} \%}{t} \text{ (mm/h)}$$

Tableau III.9 : Intensité de la pluie efficace

t	I _{eff} % (mm/h)					
	0,1	0,5	1	3	4	10
24	5,19	4,64	3,36	2,48	2,26	1,50
20	6,03	5,40	3,93	2,92	2,66	1,80
15	7,6	6,82	5,00	3,73	3,42	2,35
14,2	7,71	6,93	5,11	3,84	3,53	2,46
14	8,08	7,26	5,32	3,98	3,65	2,52
13	8,57	7,70	5,65	4,24	3,89	2,68
12	9,05	8,14	5,98	4,49	4,12	2,85
11	9,73	8,75	6,43	4,83	4,44	3,07
10	10,42	9,36	6,89	5,18	4,76	3,30
9	11,31	10,17	7,50	5,64	5,19	3,61
8	12,37	11,12	8,21	6,18	5,68	3,96
7	13,68	12,30	9,09	6,84	6,29	4,39
6	15,36	13,81	10,19	7,67	7,06	4,92
5	17,62	15,82	11,68	8,80	8,08	5,64
4	20,76	18,64	13,74	10,34	9,49	6,59
3	25,63	23,00	16,90	12,70	11,63	8,03
2	34,27	30,70	22,47	16,72	15,32	10,47
1	55,90	50,00	36,10	26,40	24,10	15,90

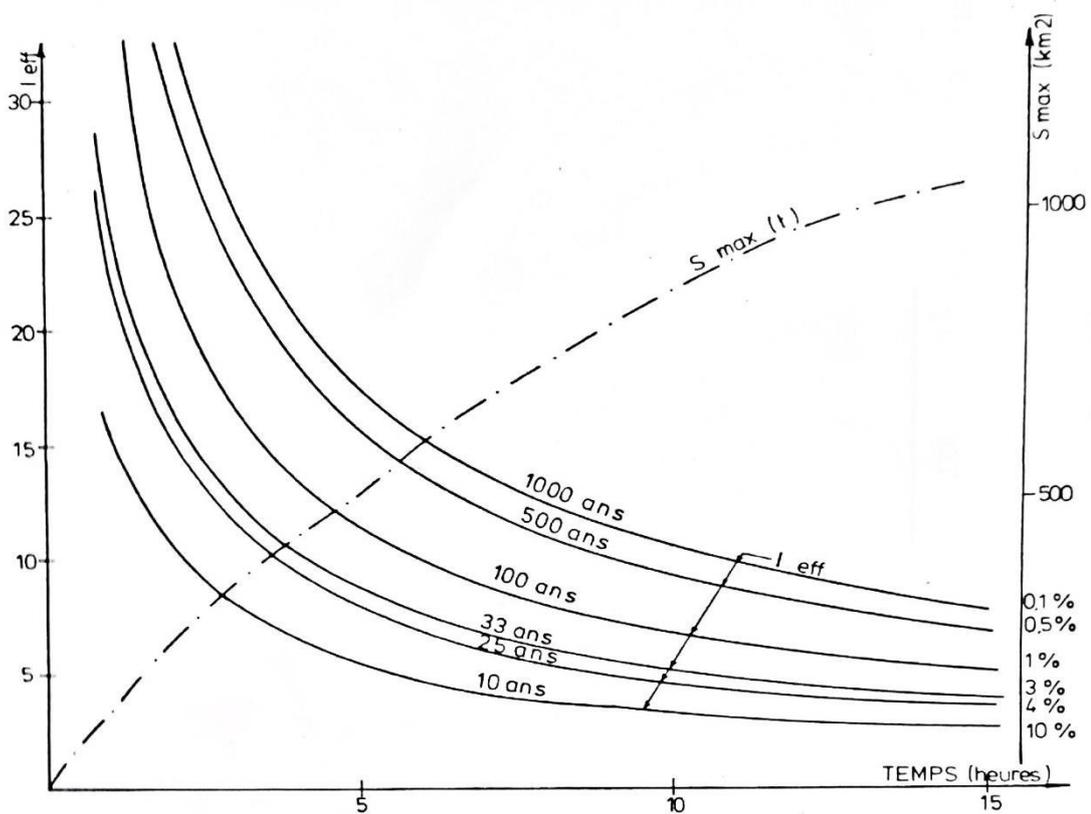


Figure III.7 : L'intensité de la pluie efficace en fonction du temps

III.4.1.3 Débits de pointe des crues

Pour déterminer la variation de la surface conditionnant le débit à l'exécutoire, il a été déterminé sur la carte d'une échelle de 1/200.000 les zones dont le temps de transfert est égale à une heure.

La mesure des surfaces des différentes zones permet de tracer les courbes de variation de S en fonction du temps au cours des averses de différentes durées (figure III.8)

Pour avoir la quantité à chaque fréquence de la crue dont le débit de pointe est maximal, il fallait étudier pour chaque durée (T) de l'averse, la variation du produit :

$$Q_{max}(t) = \frac{1}{3,6} S_{max}(t) \cdot I_{eff}(t) \text{ en m}^3/\text{s}$$

Le tableau suivant montre les résultats obtenus.

Tableau III.10 : Débit maximum de pointe

t	S _{max}	Q% (m ³ /s)					
		S _{max} · I _{eff} · 0,28					
		0,1	0,5	1	3	4	10
2	263,2	2525	2262	1655	1232	1129	772
4	445,2	2588	2323	1713	1289	1183	821
6	605,4	2604	2340	1727	1300	1197	834
8	738,4	2557	2299	1697	1278	1174	819
10	861,6	2572	2310	1701	1279	1175	815
11	920,8	2509	2256	1658	1245	1145	791
12	968,8	2455	2208	1622	1218	1118	773
13	1006,0	2414	2169	1591	1194	1096	755
14	1023,6	2316	2081	1525	1141	1046	722
14,2	1032	2228	2002	1476	1110	1020	711
15	1032	2196	1970	1445	1078	988	679
20	1032	1742	1560	1136	844	768	520
24	1032	1500	1341	971	717	653	433

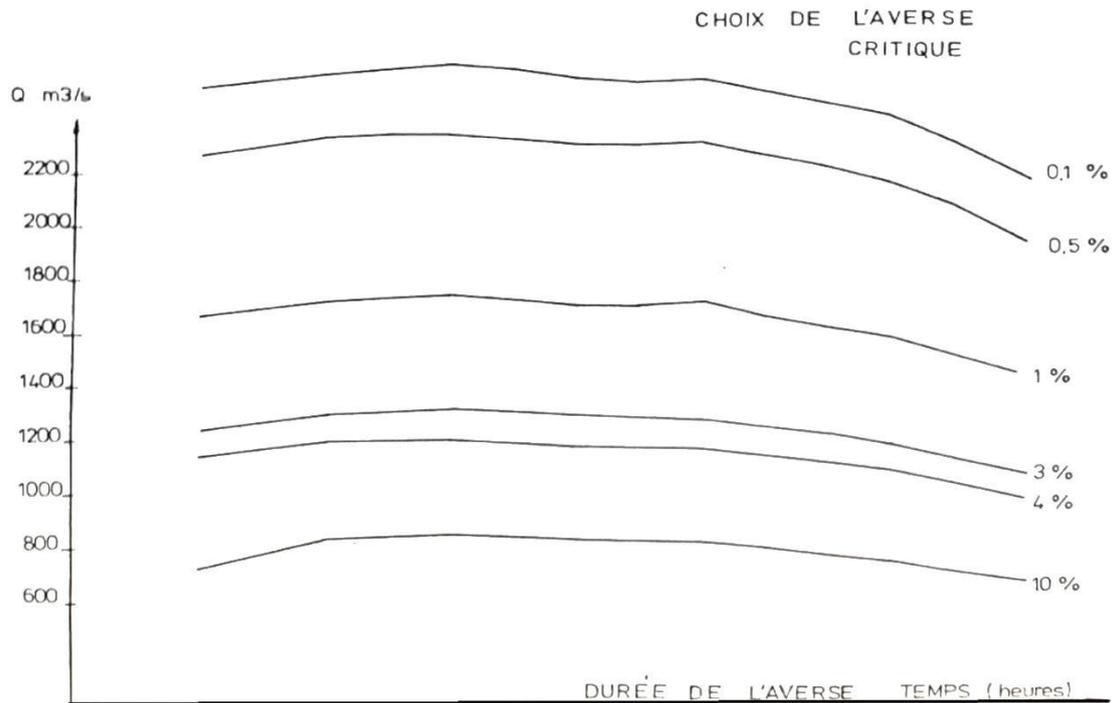


Figure III.8 : Choix de l'averse critique

III.4.2 Méthode rationnelle (formule de TURAZZA)

Cette méthode utilise l'intensité horaire maximale des précipitations déterminées sur un intervalle de référence égal au temps de concentration t_c du bassin versant.

$$Q_{max} = \frac{1}{3,6} \cdot I_{Tc} \cdot S \cdot C_r \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Où:

I_{Tc} = intensité de l'averse d'une durée T_c (mm/h)

S = superficie de bassin versant (km^2)

C_r = coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement peut être déterminé par la méthode de KENESSY, selon laquelle trois termes sont utilisés comme suit :

$$C_r = C_{r1} + C_{r2} + C_{r3}$$

C_{r1} = coefficient de pente :

1=très grande pente (35%) :	0,22 – 0,26 – 0,30
2=pente moyenne (35-11%) :	0,12 – 0,16 – 0,20
3=pente douce (11-3,5%) :	0,06 – 0,08 – 0,11
4=terrain plat (3,5%) :	0,01 - 0,03 – 0,05

C_{r2} =coefficient de perméabilité du terrain :

1 = très imperméable	0,21 – 0,26 – 0,30
2 =moyennement imperméable	0,12 – 0,16 – 0,20
3 =moyennement perméable	0,06 – 0,08 – 0,10
4 =très perméable	0,03 – 0,04 – 0,05

C_{r3} =coefficient de végétation

1 = rocher	0,26 – 0,28 – 0,30
2 = prairies	0,17 – 0,21 – 0,25
3 = terrain agricole, bois	0,07 – 0,11 – 0,15
4 = forêts, alluvions meubles	0,03 – 0,04 – 0,05

La colonne médiane correspond aux conditions moyennes.

Le tableau III.11 résume le calcul des débits de pointe

Tableau III.11 : Débits de pointe en fonction des précipitations (temps de concentration)

Fréquence %	P _{Tc} GALTON	Q _{max} (m ³ /s) GALTON	P _{Tc} (m ³ /s) GUMBEL	Q _{max} (m ³ /s) GUMBEL
0,1	156,4	1989	137,6	1750
0,5	116,6	1483	126,0	1603
1	101,1	1286	99,1	1261
3	78,4	998	80,5	1023
4	72,8	926	75,8	963
10	55,7	709	60,0	762

III.4.3 Formule de POSSENTI

La formule de Possenti est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{max} = \lambda \cdot \frac{P_{24h\%}}{L} (S_m + \frac{S_p}{3}) \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Où :

P_{24h%} = pluie de 24 heures de fréquence %

L= longueur du thalweg principal (km)

S_m= superficie montagneuse (km)

λ=coefficient morphologique λ= 800

$$Q_{max} = 800 \frac{P_{24h}}{68} (825,6 + \frac{206,4}{3}) = 10522,35 * P_{24h\%}$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau III.12 : Valeurs des débits max en fonction de la fréquence

Fréquence (%)	Q _{max} (m ³ /s)
0,1	1651
0,5	1512
1	1189
3	965
4	909
10	719

Les résultats de quatre méthodes utilisées sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III.13 : Débits maximum obtenus par différentes méthodes

Méthode	Q _{max} % (m ³ /s)					
	0,1	0,5	1	3	4	10
Synthétique	2604	2340	1727	1300	1197	834
Rationelle1	1989	1483	1286	998	926	709
Rationelle2	1750	1603	1261	1023	963	762
Possenti	1651	1512	1189	965	909	719

III.5 CONCLUSION

La période d'enregistrement (1970-1978) nous semble être trop courte pour être représentative des débits qui passent par cette station. Ce qui fait l'originalité du ruissellement des cours d'eau de la région de Bou Saada, c'est la violence des crues. Bien que celles-ci soient très brèves, elles sont très spectaculaires et parfois même calamiteuses.

L'exemple de la crue d'août 1982 est très significatif. Selon les observations de la population de la ville et les renseignements du chef de D.H.W. de Bou Saada, une crue exceptionnelle a eu lieu dans l'oued Bou Saada causant des dégâts importants dans la ville prouvant ainsi l'existence de débits exceptionnels largement supérieurs à ceux enregistrés.

Chapitre IV

Etude de la recharge de la nappe de la plaine d'El Maader

IV.1 INTRODUCTION

Mobiliser les ressources en eau de surface en construisant des retenues, éviter les pertes qui se produisent sous forme de crues, tel est l'objectif de toute étude hydrologique.

Bien que les valeurs des écoulements que nous avons avancées ne constituent qu'une approche de la réalité du terrain, il n'en demeure pas moins que ces ressources sont loin d'être négligeables. En témoignent les fortes crues que connaissent les oueds de Bou Saada et de Maiter.

IV.2 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Les réalimentations de nappe en service sont fréquentes dans de nombreux pays du monde, aussi bien en pays tempérés qu'en pays chauds et secs. Les objectifs d'une réalimentation de nappe peuvent être très différents d'un site à un autre :

- stockage d'eau en période excédentaire ;
- maintien des niveaux piézométriques (pour maintenir la productivité des captages ou pour éviter l'intrusion d'un biseau salé ou pour lutter contre la subsidence des terrains ou pour soutenir le débit d'étiage d'un cours d'eau, etc ...) ;
- amélioration de la qualité de l'eau (soit pour assurer la dilution d'une eau de nappe polluée, soit pour améliorer la qualité d'une eau brute) ;
- rejet d'une eau excédentaire (soit pour assurer son épuration, soit pour lutter contre les inondations).

La mise en œuvre d'un projet de recharge artificielle de nappe est toujours complexe. En effet, il est indispensable, pour aboutir à des résultats satisfaisants, tant techniques qu'économiques, et pouvoir les estimer, de bien connaître avant la réalisation :

- les causes et les manifestations du problème constaté ;
- l'état zéro avant aménagement (niveaux piézométriques, productivité des captages, qualité de l'eau, exutoires naturels de la nappe...) ;
- les caractéristiques du milieu récepteur ;
- les objectifs à atteindre ;
- la ressource (origine de l'eau de recharge, qualité, potentialité, cycle...) ;
- le montant de l'investissement et coût du fonctionnement des dispositifs.

Un projet de recharge artificielle de nappe est donc avant tout multidisciplinaire. Il regroupe un grand nombre des disciplines des sciences de la terre ou de la géoingénierie : hydrogéologie, hydrologie et climatologie, hydraulique, chimie, biologie, géotechnique, génie-civil, mécanique, sociologie, économie, etc...

Il doit être envisagé comme une solution alternative, tant technique qu'économique, aux solutions plus classiques telles que interconnexion, ressource de substitution, barrage, traitement...

IV.3 LA PLAINE D'EL MAADER

A quelques 8 km du chef-lieu de la daïra de Bou Saâda, la localité d'El-Maader impressionne celui qui s'y rend pour la première fois par son important potentiel agricole contrastant considérablement avec l'environnement semi-aride qui caractérise cette partie des Hauts-plateaux.

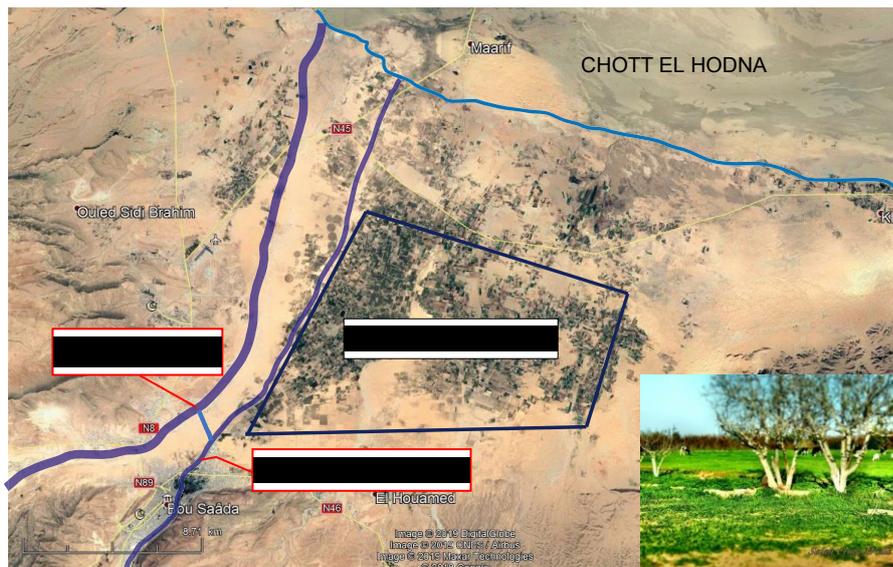


Figure IV.1 : Situation de la plaine d'El Maader

Dans le cas objet de cette étude, il s'agit clairement de réalimenter la nappe d'El Maader dans le but de soutenir le niveau piézométrique pour maintenir la productivité des ouvrages.

Le principal aquifère de ce secteur est composé de formations conglomératiques et sableuses du Mio-Pliocène continental d'une épaisseur qui peut atteindre par endroit les 250 mètres.

Nous reprenons ici le seul log de forage disponible au niveau de la sous-direction de l'hydraulique de Bou Saada, pour constater que nous sommes en présence de deux niveaux

aquifères, tout au moins dans les environs de ce forage, la première nappe est de 0m à 80m et la seconde de 120m à 160m. Les deux nappes sont séparées par une formation argileuse et marneuse de 40m.

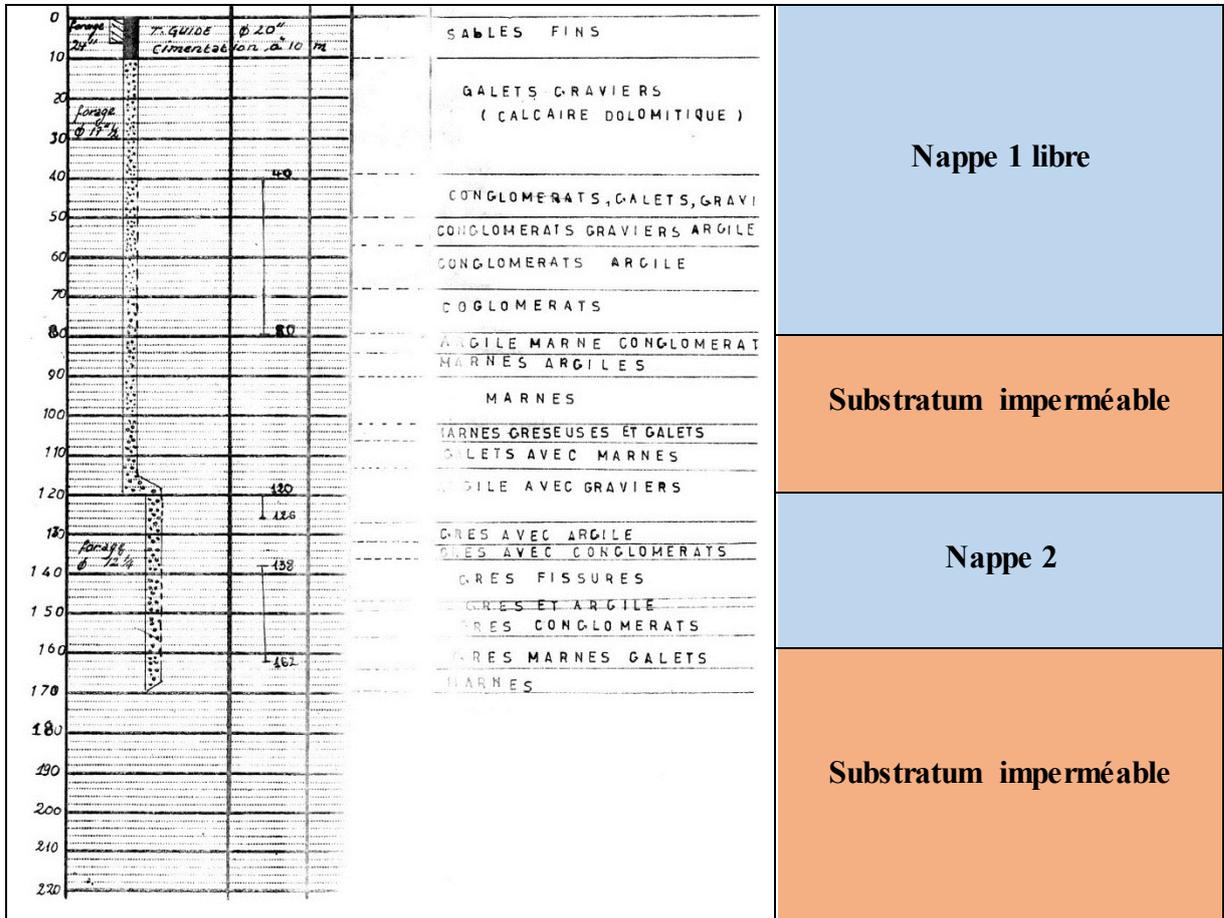


Figure IV.2 : Disposition des nappes dans la région d'El Maader

A l'affleurement ou en sondages, les différentes descriptions géologiques montrent plusieurs alternances, souvent désordonnées, d'argiles, d'argiles sableuses, de grès ou sables parfois argileux et des conglomérats au sommet.

En réalité, cette superposition correspond au schéma très simplifié des grands ensembles qui présentent sur le terrain d'importantes variations latérales et verticales de faciès. Cette variation de faciès donne aux couches argileuses et gréseuses du Mio-Pliocène des formes dites « lenticulaires » de telle sorte que les couches perméables (nappe 1 et nappe 2) peuvent être dans certains endroits en contact direct.

Malheureusement, nous n'avons pas assez d'arguments et de données pour confirmer ou infirmer la présence de ce phénomène au niveau de l'aquifère d'El Maader et nous pensons qu'une étude géophysique de détail est indispensable pour connaître la structure géologique de cette aquifère, comme cela a été fait au Nord et à l'Est de Chott El Hodna (figure IV.3).

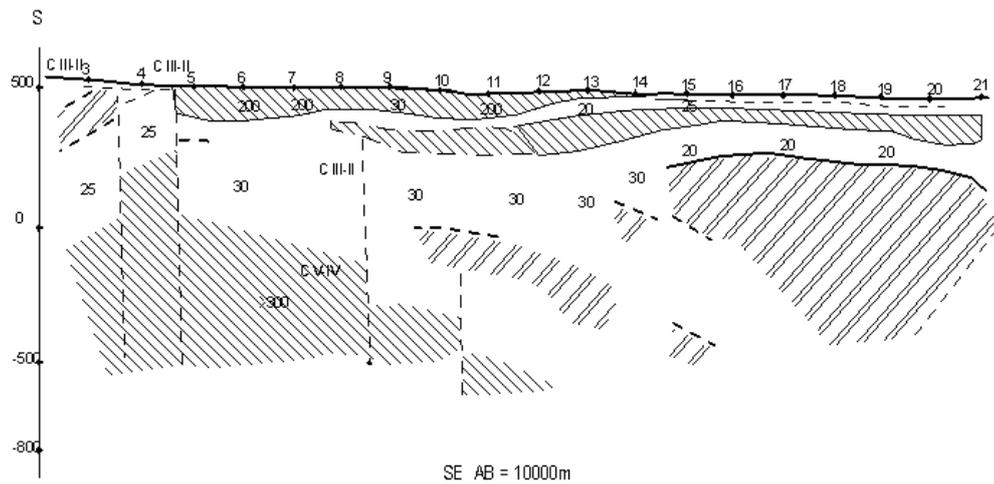


Figure IV.3 : Coupes géoélectriques établies par la CGG à l'ouest du chott

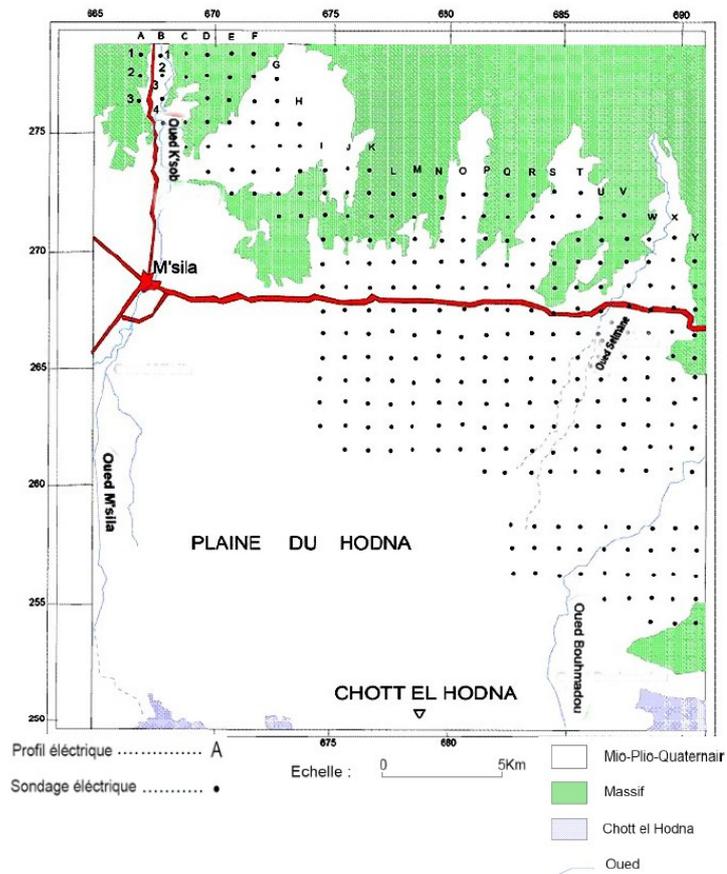


Figure IV.4 : Carte de situation des sondages électriques au Nord d'El Hodna (2002).

Nous pouvons constater, d'après la figure IV.4 que la nappe d'El Maader possède deux sens d'écoulement ; le premier Sud-Ouest vers le Nord-Est dans la partie Est et le second du Sud vers le Nord dans la partie centrale. Les deux sens d'écoulement convergent vers le Chott.

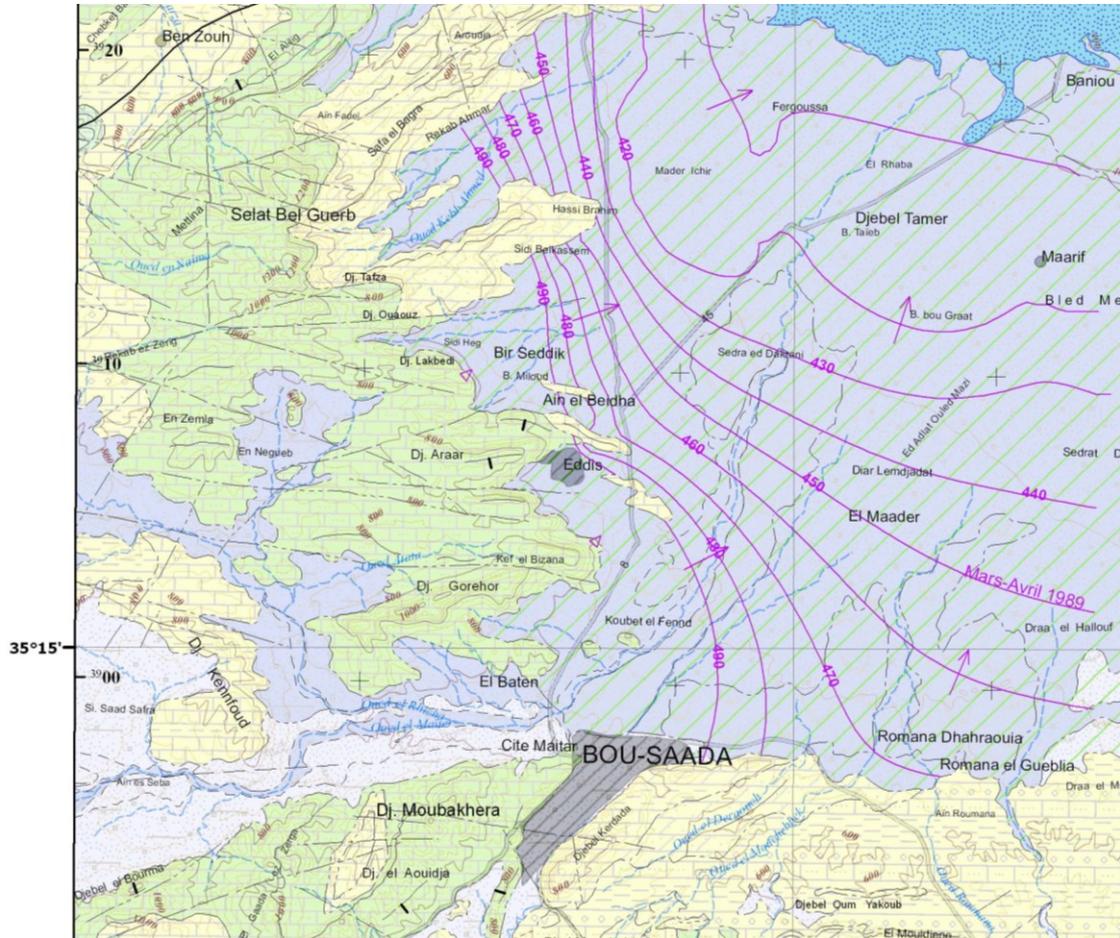


Figure IV.5 : Piézométrie de la plaine d'El Maader – Mars-Avril 1989 (extrait de la carte hydrogéologique, ANRH)

IV.4 EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

Les premiers forages étatiques au nombre de quatre (04) qui alimentaient la ville de Bou-Saada avaient un débit d'exploitation de 36 à 44 l/s au début de leur mise en service en 1993.

Actuellement, et après le tarissement de certains forages et la réalisation de plus de Six (06) nouveaux forages, le débit n'est que de 05 à 10 l/s.

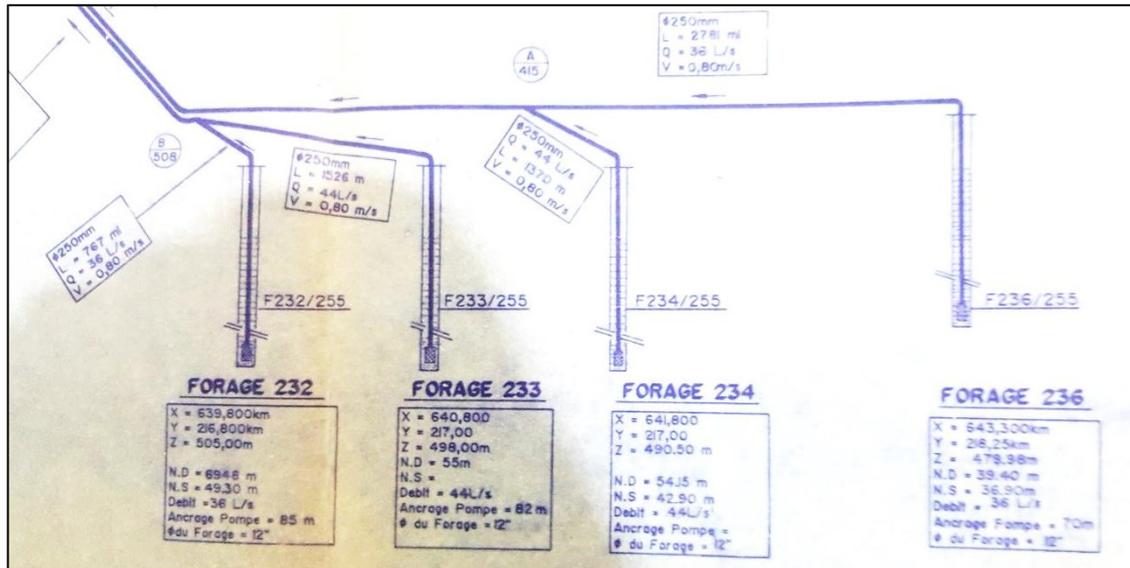


Figure IV.6 : Forages alimentant la ville de Bou Saada (1993)

L'ensemble de la nappe d'El Maader (zone Est et zone Ouest et Maarif) est exploité d'après la dernière campagne d'inventaire par plus de 650 forages.

L'augmentation la plus importante du nombre de forage s'est manifestée depuis l'avènement du Fonds national de régulation et de développement agricole (FNRDA) en 2000, qui a permis l'octroi d'autorisations de forage à un rythme sans précédent durant 4 ans, engendrant après coup le rabattement de la nappe dont le niveau a oscillé entre 10m et 40 m. La sonnette d'alarme a été tirée en mars 2002, à la suite d'une étude élaborée à cette époque par l'ANRH, concluant qu'il y avait surexploitation de la nappe à un taux estimé 236%.

D'autres indices étaient révélateurs de cette surexploitation, ils se résument en la diminution, voire la disparition du phénomène de l'artésianisme et de l'assèchement des forages, notamment les puits traditionnels ne dépassant pas 50 m et de l'augmentation de la teneur de certains composants, notamment les nitrates qui ont affecté foncièrement la qualité de l'eau.

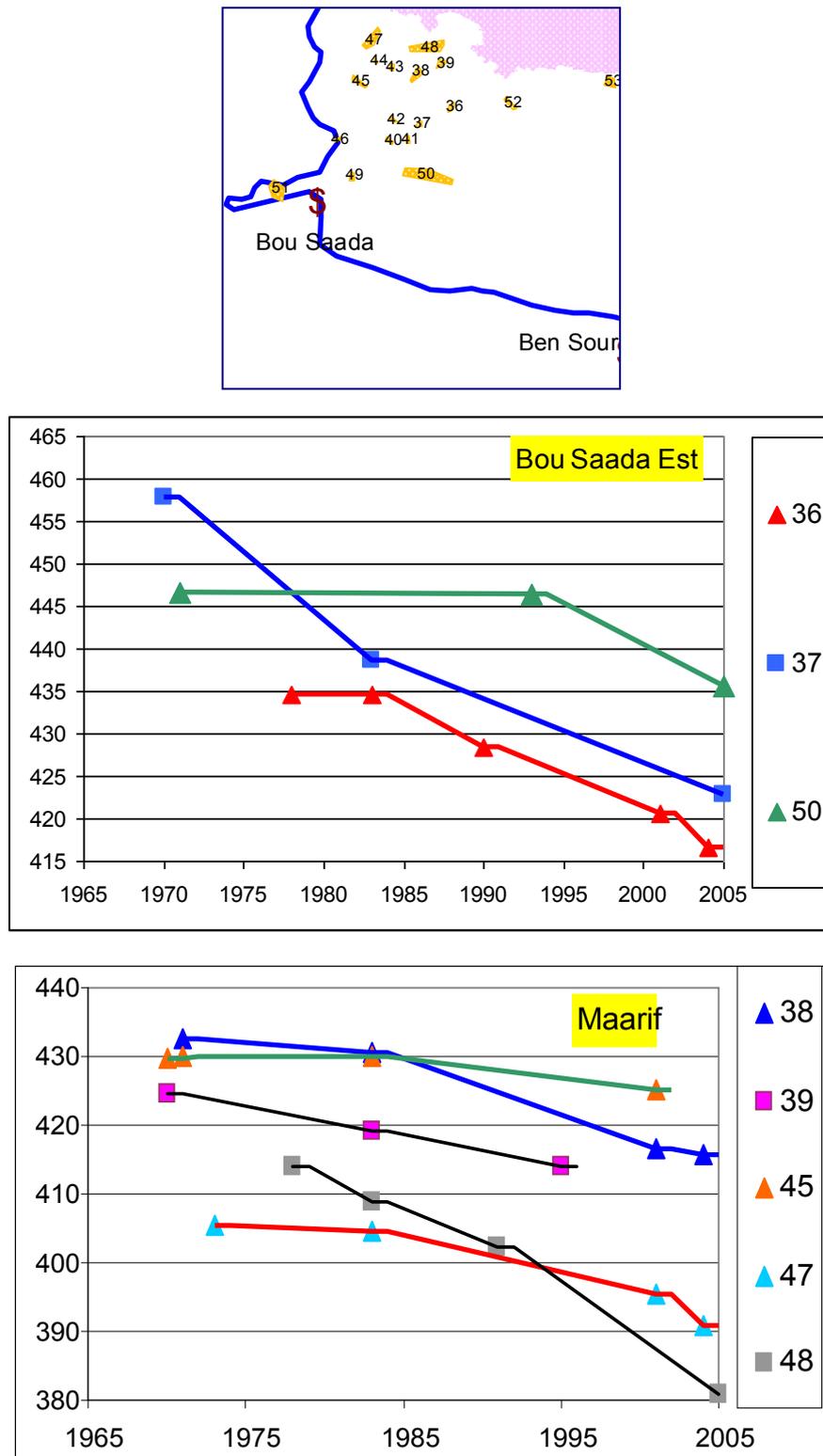


Figure IV.7 : Rabattements de la nappe d'El Maader sur la période 1970-2005 [16]

IV.5 ALIMENTATION DE L'AQUIFERE

L'alimentation de l'aquifère d'El Maader se fait principalement par trois voies ; infiltration directe des précipitations, infiltration des eaux de crues et échanges entre aquifère.

IV.5.1 Infiltration directe des précipitations

En zone aride, cette infiltration ne constitue pas une source déterminante d'apports aux nappes souterraines, du fait d'un déficit hydrique permanent, avec moins de 200mm par an.

IV.5.2 Infiltration en période de crues

Ce type d'infiltration n'est possible qu'à la faveur des concentrations du ruissellement dans le lit des cours d'eau, et étant donné le régime de ces oueds, ce phénomène est très irrégulier, mais peut être exceptionnellement important. Ce mode de recharge peut se faire à la faveur de oued Bou Saada et oued Maiter et se produit lors du passage de crues naturelles dans les lits des cours d'eau, mais il peut également se produire en cas d'épandage des crues sur des sols agricoles.



Figure IV.8 : Crue de oued Bou Saada

IV.5.3 Alimentation profonde

Les formations conglomératiques et sableuses du Mio-Pliocène continental reposent en discordance sur les formations du crétacé. Les structures grésos-carbonatées du Crétacé (Barrémo, Albien, Turonien), peuvent former le principal soutien de la nappe en profondeur.

En effet, il peut y avoir continuité hydraulique entre la nappe du Mio-Pliocène profonde à perméabilité d'interstices et ce substratum à niveaux cassant, donc à perméabilité de fissures. Ce dernier possède un vaste impluvium qui s'étend à l'Ouest, où il affleure à des altitudes plus élevées et où s'effectue la recharge de l'aquifère.

Cette hypothèse reste à confirmer par des études plus détaillées (forages profonds et prospection géophysique).

IV.6 RECHARGE DE LA NAPPE D'EL MAADER

Le but de cette étude est de rechercher dans les zones favorables des sites potentiels d'aménagement d'ouvrages de réalimentation et le type du dispositif approprié. Le choix de sites est effectué en fonction des critères suivants :

- Situation à l'intérieur des zones favorables
- Disponibilité de terrain aménageable
- Origine, potentiel et qualité des eaux destinées à la recharge

Notre choix s'est porté sur trois solutions ou dispositifs pour alimenter la nappe d'El Maader par les deux oueds (Bou Saada et Maïter), pendant les périodes de crues.

IV.6.1 Dispositifs des seuils

Par définition, un seuil en rivière est un ouvrage de faible hauteur construit dans le lit mineur d'un cours d'eau dans le but de rehausser la ligne d'eau et non pas de stocker de l'eau. Le lit mineur est barré totalement dans le sens de la largeur, et partiellement dans le sens de la hauteur et donc les faibles débits ne provoquent pas de débordement dans le lit majeur. Afin d'éviter une confusion fréquente.

La réalisation d'un seuil se fait selon les étapes suivantes :

- Réalisation du levé topographique au niveau du profil en travers du seuil fixe pour implanter le seuil et la protection en gabions.
- Réalisation des fouilles de 2,50 mètres de profondeur sur 5 mètres de largeur, tout le long du profil en travers du seuil fixe.
- Mise en place de murs de protection, des rives de l'oued, en gabions sur une longueur de 100 mètres, pour chaque rive (75 m en amont du seuil et 25 m en aval du seuil).



Figure IV.9 : Seuil (Haous Marrakech royaume du Maroc 2013)

IV.6.1.1 Les matériaux des seuils

II.6.1.1.1 Gabionnage

Les gabions sont des structures formées de cages grillagées parallélépipédiques emplies de cailloux ou de galets. Ils sont classiquement utilisés pour construire des soutènements verticaux ou pour revêtir des berges et ils sont aussi utilisés pour construire des seuils.

Les gabions semelle sont placés entre les gabions et le terrain de fondation afin de mieux répartir les charges.

La disponibilité à même le site des matériaux et le coût financier relativement bas font que cette solution se prête facilement à la réalisation.

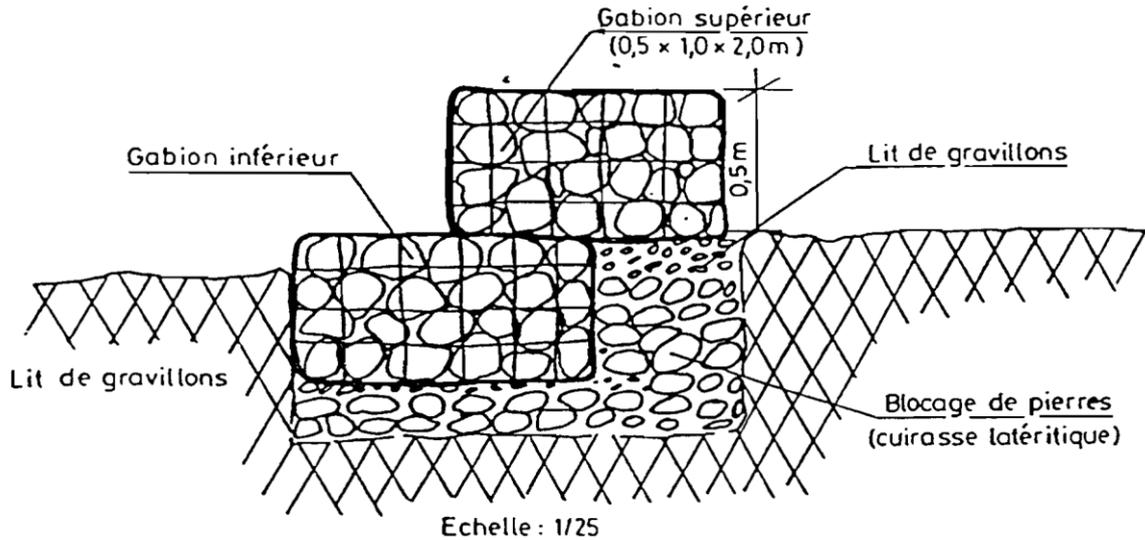


Figure IV.10 : Coupe technique transversale de seuil en gabion

II.6.1.1.2 Seuil en béton

Les seuils d'infiltrations ou les dérivations en maçonnerie (ou en béton) ont montré leur preuves et sont adaptés aux conditions et aux régimes hydrologiques et hydrauliques difficile. De plus, la nature alluvionnaire de lit de l'oued et le charriage des crues (moellons, blocs rocheux, ...) font que les matériaux pour réaliser des seuils en béton sont disponibles in-situ pour la majorité des sites.

L'implantation d'un tel dispositif nécessitera préalablement un reprofilage de l'oued aux alentours de l'axe du seuil défini afin d'homogénéiser et corriger les sections transversales au droit du dispositif. En plus, une protection des talus s'impose afin de réduire les risques d'érosion des berges.



Figure IV.11: Construction des seuils par béton (Haous Marrakech royaume de Maroc 2013)

II.6.1.1.3 Seuil avec blocs fusibles

Les blocs fusibles sont des éléments massifs en béton simplement posés les uns à côté des autres sur le seuil, ils sont auto-stables jusqu'à ce que le niveau d'eau à l'amont atteinte un certain niveau pour lequel ils basculent.

Ces éléments se caractérisent par une forme géométrique simple, ils sont fabriqués en béton ordinaire coulé sur place ou préfabriqué, ils possèdent la même hauteur mais peuvent avoir des largeurs différentes et donc des poids différents. Les blocs fusibles sont posés au long de lit de l'oued après un faible arasement du seuil, sous forme d'un rideau qui assure l'obturation de l'écoulement. L'étanchéité entre les blocs fusibles adjacents est assurée par un joint en plastique, de même entre les blocs et le seuil. A l'aval immédiat des blocs, des butées sont réalisées pour empêcher leur glissement.

II.6.1.1.4 Objectif de la conception des blocs fusibles

Les blocs fusibles sont conçus pour faire accroître le stockage. La tranche récupérée est comprise entre le niveau normal de lit et le niveau le plus haut d'eau.

II.6.1.1.5 Augmentation de la capacité du stockage

Les blocs fusibles fonctionnent sous une charge d'eau maximale fixe. Une partie de cette tranche peut être récupérée pour faire augmenter le niveau de seuil par l'emplacement des blocs fusibles sur le site existant sans pour autant affecté la sécurité des berges ou le risque d'inondation sur la zone.

Les blocs fusibles représentent une solution efficace et économique, pour le recouvrement de la tranche perdue de l'eau, en augmentant la hauteur du seuil, tout en conservant la capacité d'évacuation par un seuil à surface libre.

II.6.1.1.6 Amélioration de la sécurité des évacuateurs de crues

L'étude hydraulique qui consiste de la détermination des débits des crues, et surtout avec les changements climatiques actuels est devenu une nécessité pour éviter les dangers probables, au fort débit de crues, par rapport à la crue de projet. Ceci exige la recherche de solutions pour faire passer ces crues en sécurité.

Les blocs fusibles sont l'une des solutions efficaces qui permettent d'augmenter la capacité de déversement, en faisant abaisser le seuil, pour obtenir une charge plus grande que l'initiale et par conséquent, augmenter le débit évacué lors d'une crue exceptionnelle. La mise en place de ces blocs sur le seuil après l'arasement, permet de conserver le volume d'eau dans le bassin, tandis que le passage des crues est assuré.

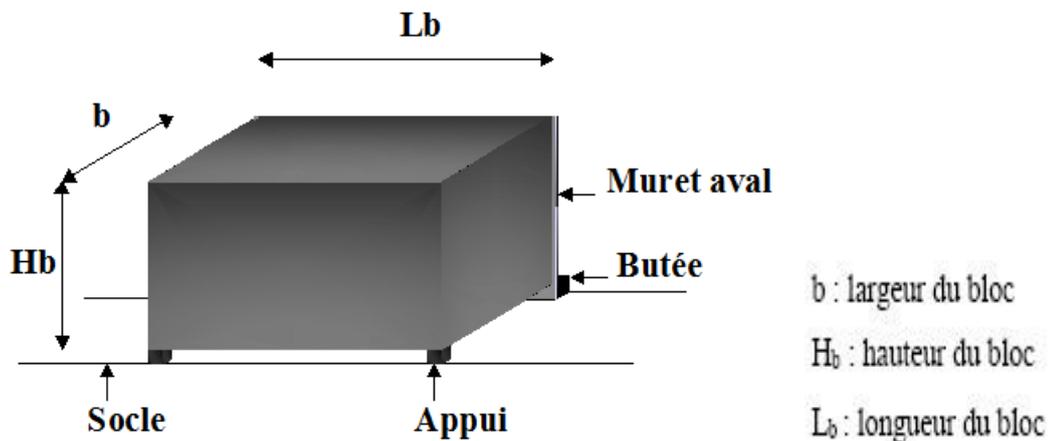


Figure IV.12 : Schéma descriptif d'un bloc fusible



Figure IV.13 : Déversoir équipé par des blocs fusibles

IV.6.2 Protection des berges

Le traitement des berges ou la protection est la première étape pour choisir le site et la hauteur du seuil. Pour protéger une berge de l'érosion, il faut s'opposer à la cause en interposant un entre la berge et l'eau (méthode de revêtement).

Le revêtement des berges peuvent être à priori réalisé par les gabions. Ces derniers sont classiquement utilisés pour construire des soutènements verticaux ou pour revêtir les berges à l'amont et à l'aval du seuil sur une longueur de 30 à 80 mètres.



Figure IV.14 : Berge protégée par gabion

Un autre moyen de protection des berges et de surélever les extrémités du seuil afin qu'il puisse avoir la même hauteur que les berges.



Figure IV.15 : Protection de la berge par seuil

IV.6.3 Position et Caractéristiques des seuils sur oued Bou Saada

Les sites potentiels susceptibles de mise en œuvre de recharge et leur implantation doit être entreprise sur la base d'investigation de terrain, qui doivent apporter des éléments de réponse relatifs à l'occupation des sols, la morphologie, la géologie du terrain, la nature des fonds d'oueds et des berges, ainsi que les considérations socioéconomiques (habitation, accès...) et doivent être détaillés comme suit :

- Identification du site (coordonnées, accès, croquis)
- Nature des dépôts du lit et son pouvoir filtrant
- Aspect socioéconomique et activités dans la zone du site
- Nature des matériaux de construction
- Largeur de la section, pente, profil de l'oued...
- Nature géologique et lithologique du site (lit et berges...)
- Caractéristiques des berges avec enquêtes sur les traces des crues antérieures

- Occupation des sols au niveau du site (cultures, plantation, gravières, habitations, aménagements hydro-agricoles...).

Malheureusement, nous disposons de peu de données et il est très difficile et fastidieux d'entreprendre ce genre d'investigation dans le cadre d'un mémoire de Master.

Néanmoins, nous avons essayé d'avancer certaines caractéristiques.

Tableau IV.1 : Caractéristiques des seuils sur oued Bou Saada

Nombre du seuil	Situation Coordonnées GPS	<i>l</i> (m)	H (m)	Matériau de construction	Profondeur (m)	<i>I</i> %	L (m)	Capacité de stockage (m ³)
1	35°14'47.37 4°12'29.29	64,4	1	Gabion	1	1,56	63,9	4115
2	35°16'06.46 4°14'07.45	195	1	Gabion	1	0,39	255,3	49783
3	35°16'40.11 4°14'37.42	169	1	Gabion	1	0,53	188,2	36322
4	35°17'31.52 4°15'10.75	183	1	Gabion	1	0,489	204,2	37368
5	35°18'05.64 4°15'33.71	158	1	Gabion	1	0,489	204,2	32264

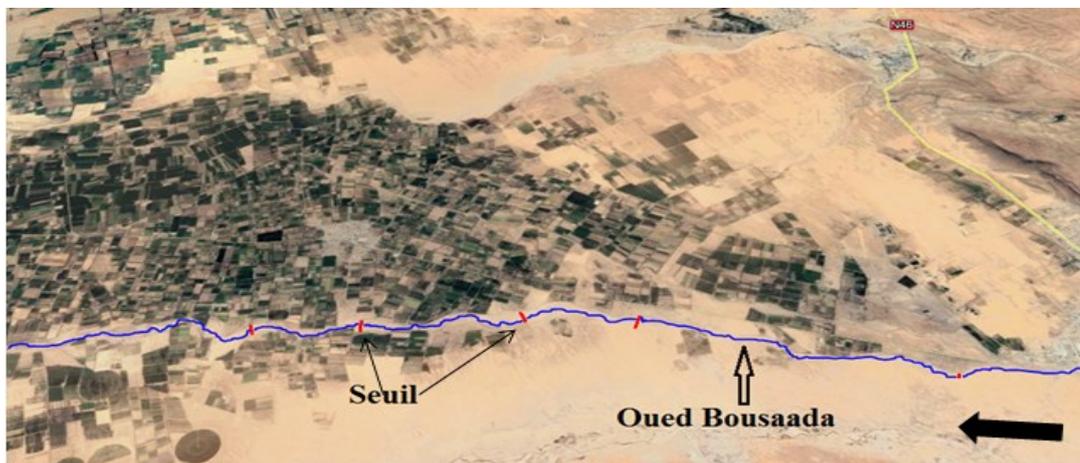


Figure IV.16 : Estimation de la position des seuils sur oued Bou Saada

Oued Bou Saada est connu pour ces crues, parfois exceptionnelles, de printemps et d'automne. Ces crues ont provoqué, lors de leur passage dans la plaine d'El Maader, des inondations et le sapement des berges, érodant et emportant ainsi sur leur trajet de grandes quantités de terrains agricoles.

Les autorités locales ont cherché des solutions pour limiter les dégâts engendrés par cette situation. Il a été décidé en 2008 de créer une déviation de Bou Saada vers oued Maiter.

Il nous semble que solution a été faite à la hâte et sans aucune étude scientifique, à tel enseigne que oued Bou Saada s'est vu soustrait de plus de 60% du débit des crues. Réduisant ainsi le taux d'infiltration des eaux à la faveur du lit de l'oued.

Il nous semble qu'il est indispensable de recalibrer l'écoulement de oued Bou Saada de sorte qu'il puisse véhiculer plus d'eau de crues.

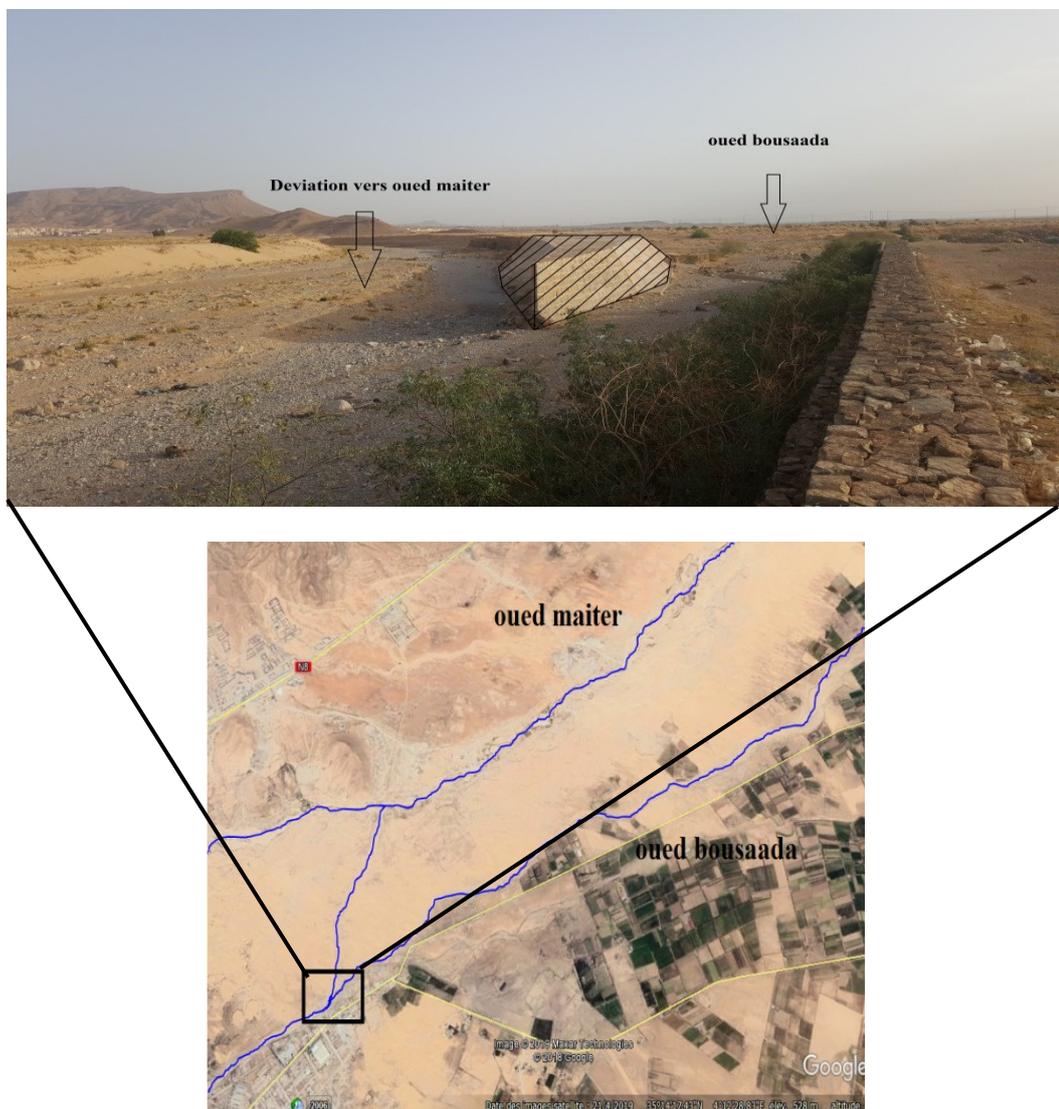


Figure IV.17 : Oued Bou Saada dans la partie de la déviation

IV.6.4 Les puits d'infiltration

Les puits filtrants sont des ouvrages ponctuels, peu profonds qui permettent le transfert des eaux vers les couches perméables du sol et l'infiltration. Ils sont dimensionnés pour répondre au besoin de la zone collectée et alimentés directement par ruissellement, soit par des drains ou collecteurs.

Ce dispositif est une méthode destinée à recharger les nappes souterraines et a été utilisée dans la région de Ghardaïa par les mozabites depuis des siècles (figure IV.17).



Figure IV.18 : Puits filtrant dans la région de Ghardaia

Le puits d'infiltration permet de stocker temporairement l'eau des crues, puis les évacue par infiltration dans le sol. L'infiltration se fera différemment selon :

- La nature du sol : plus ou moins perméable en fonction de sa composition.
- Les dimensions du puits d'infiltration.
- La nature des matériaux utilisés lors de la construction du puits.

Nous préconisons de réaliser les puits filtrants sur le même site des seuils à l'amont de la digue. Les ouvrages devront être visitables et régulièrement entretenus de manière à garantir leur bon fonctionnement en permanence. Tous les équipements nécessitant un entretien régulier doivent être pourvus d'un accès permettant leur desserte en toute circonstance notamment par des véhicules d'entretien.

Le dimensionnement des puits ont un diamètre de 0,8 à 1 m et profondeur de 10 à 20 m. Il peuvent avoir une marfelle d'une hauteur de 20 à 30 cm.

IV.6.4.1 Matériaux de construction

La construction de ce dispositif par des drains à grand diamètre est construite localement en béton et placée sur le site après le creusement de site



Figure IV.19 : Puits filtrants absorbant

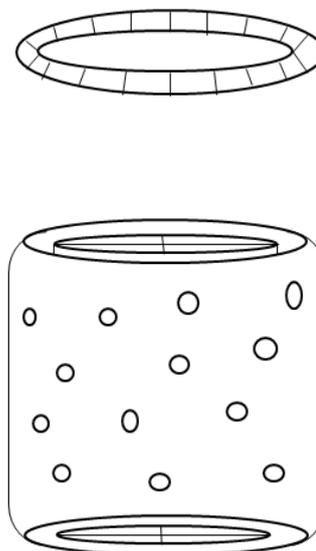


Figure IV.20 : Modèle de coupe pour réaliser les drains.

IV.6.4.2 Sécurités du site

On sécurise les puits par un grillage métallique avec dimensionnement moyen pour les gros débris ramenés les eaux des crues et éviter les risques de chute d'animaux et qui pourraient mener à la contamination de la nappe.

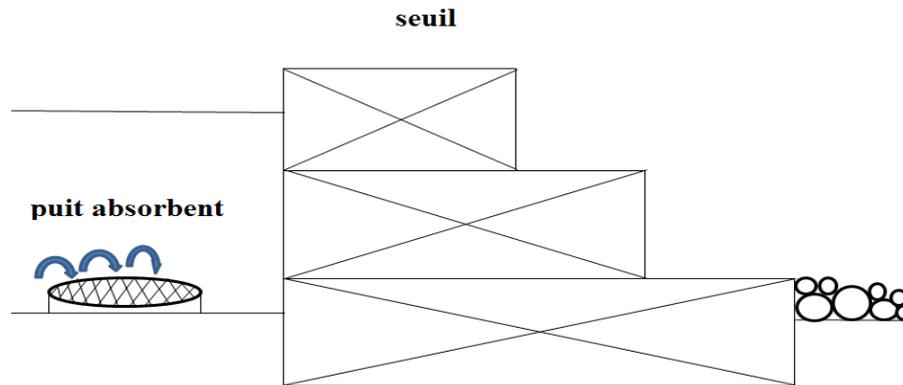


Figure IV.21 : Schéma d'un seuil avec un puit absorbant.

IV.6.5 Epannage sur des surfaces libres

Ces dispositifs rustiques présentent l'avantage d'être peu coûteux et de ne pas geler les surfaces d'épandage qui hors période d'infiltration peuvent être utilisées par les cultures. L'alliance épandage, culture évite les phénomènes de colmatage. Les coûts de fonctionnement sont donc exclusivement dus à la réalisation périodique de rainures et de diguettes.

IV.6.5.1 Le site d'épandage

Dans le cas de notre étude, la zone choisie est la surface libre entre les deux oueds à partir de la dérivation d'oued Bou Saada d'une superficie de 2 km². L'épandage peut se faire par création d'un seuil au niveau de l'entrée de la déviation afin de surélever les eaux de crues et provoquer un débordement sur la surface libre (Figure IV.22).

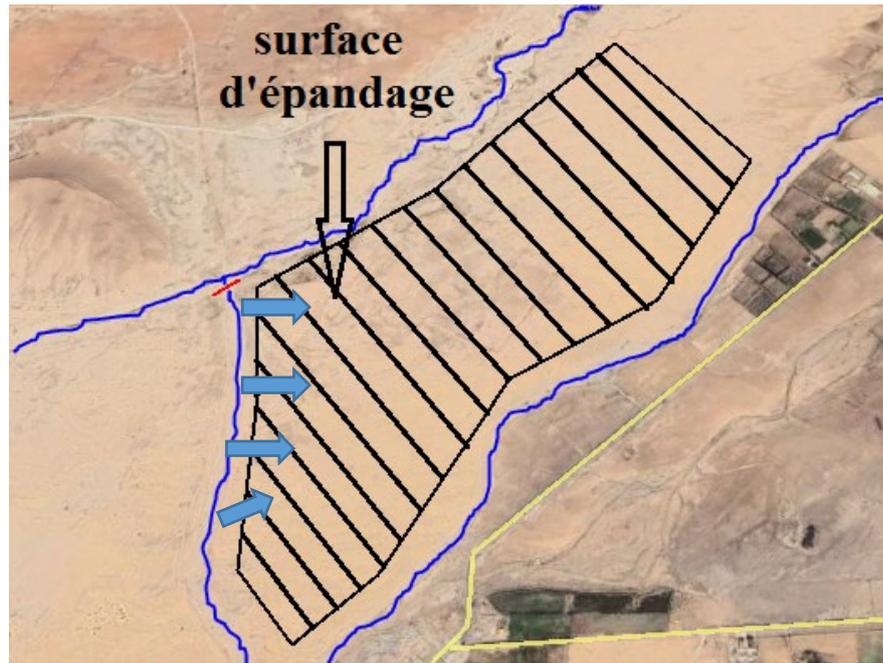


Figure IV.22 : Epannage des eaux de crues.

L'eau traverse la zone non saturée lors de son transfert vers l'aquifère. L'eau peut ainsi être potentiellement épurée par son contact avec le sol qui permet l'élimination de certains agents pathogènes mais aussi de substances inorganiques et organiques potentiellement contaminantes.

IV.6.6 Position et Caractéristiques des seuils sur oued Maiter

L'oued Maiter est situé à l'Ouest d'El Maader, d'une longueur de 63 km vers Chott EL Hodna. Le lit de l'oued est très large comparativement à celui de oued Bou Saada et les berges ont besoin d'un traitement et d'une protection. Les rives de l'oued ont des surfaces libres avec des petites collines.



Figure IV.23 : Le lit d'Oued Maiter

Les caractéristiques des seuils sont les suivantes :

Tableau IV.2 : Caractéristiques des seuils sur oued Maiter

nombre du seuil	Situation Coordonnées GPS	<i>l</i> (m)	<i>H</i> (m)	Matériaux de construction	Prof (m)	<i>I</i> %	<i>L</i> (m)	Capacité de stockage (m ³)
1	35°14'21.10 4°10'19.71	194	1	Gabion	1	0,5	182,9	26611
2	35°14'45.71 4°11'17.47	165	1	Gabion	1	0,62	159,6	19750
3	35°14'58.66 4°11'46.09	124	1	Gabion	1	0,62	159,6	14842
4	35°16'05.58 4°12'47.81	308	1	Gabion	1	0,53	187,1	43220
5	35°17'15.09 4°13'29.82	286	1	Gabion	1	0,75	133,5	28635

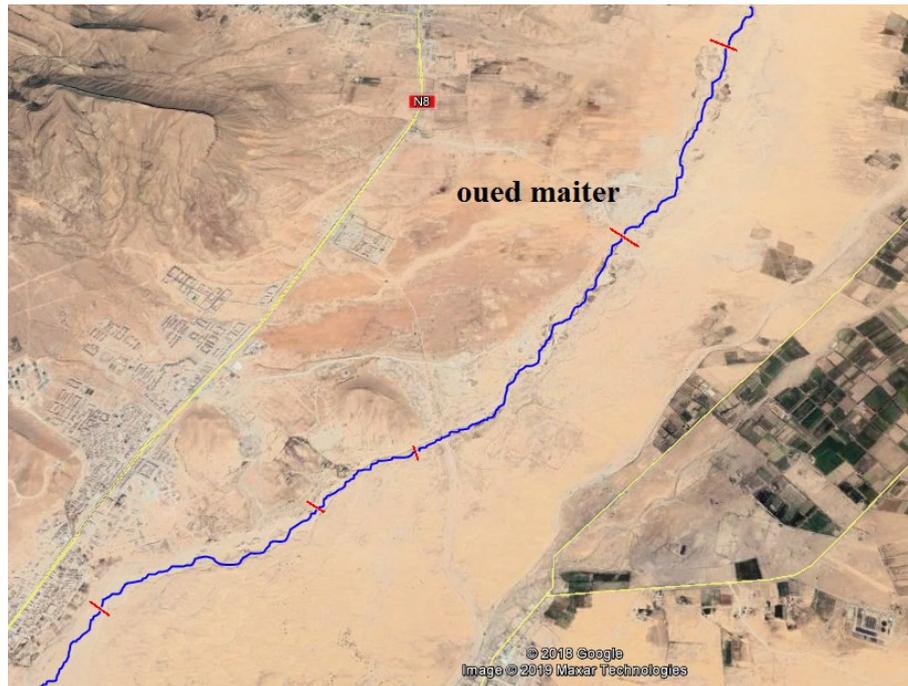


Figure IV.24 : Estimation de la position des seuils sur oued Maïter

IV.6.6.1 Les puits filtrants

Dans le cas de oued Maïter, nous adoptant le même modèle à oued Bou Saada. La largeur du lit de l'oued étant assez grande ce qui permet de disposer à l'amont de chaque seuil un à deux puits absorbants.

Le creusement du puit sur le lit est assez facile vue que la structure géologique est stable dans des premières couches. L'entretien de l'aménagement est économique est rapide.

IV.7 FAISABILITE D'UN DISPOSITIF DE RECHARGE ARTIFICIELLE ET MOYENS DE SURVEILLANCE

Une fois identifié le site de recharge artificielle en tenant compte des contraintes de disponibilité d'eau, des caractéristiques hydrogéologiques, cinq étapes sont en général nécessaires :

1. l'évaluation préliminaire de la faisabilité d'un dispositif de recharge sur le site sélectionné à partir des données existantes ou d'outils de modélisation,
2. la conception du dispositif de recharge,

3. la réalisation d'une étude détaillée sur site afin de valider ou compléter les résultats obtenus lors de l'étape 1,
4. la construction d'un pilote ou dispositif expérimental à une échelle permettant l'extrapolation suivie de la réalisation d'essais préliminaires,
5. l'agrandissement du site de recharge à une échelle opérationnelle.

Pour limiter les risques sanitaires et environnementaux, la caractérisation "eau-roche" de la zone non saturée doit être menée. Les critères pouvant affecter les processus géochimiques et microbiologiques favorisant l'épuration des eaux de recharge sont :

- (i) le pH,
- (ii) le potentiel d'oxydoréduction,
- (iii) la concentration en matière organique et
- (iv) la minéralogie.

Les moyens de surveillance de la qualité de l'eau recommandés pour caler un modèle de transfert réactif en zone non saturée comprennent les dispositions suivantes :

- mesures de paramètres physico-chimiques : saturation en eau, pression de l'eau, température, conductivité, potentiel redox, pH des eaux d'infiltration,
- échantillonnage et analyse des eaux de la zone non saturée,
- échantillonnage des sols pour une analyse minéralogique et microbiologique,
- tests de perméabilité sur les sols et sous-sols du site de recharge.

IV.8 CONCLUSION

La plaine d'El Maader renferme un aquifère fortement menacé par la surexploitation. Le rôle stratégique que joue cet aquifère dans le développement socio-économique de la région impose la mise en place d'urgence d'actions de sauvegarde, de protection et la mise en place de dispositifs de recharge artificielle en vue de restaurer une partie du potentiel hydraulique exploité dans cet aquifère.

La connaissance du pouvoir infiltrant des terrains de surface, l'épaisseur de la zone non saturée et la diffusivité de l'aquifère, permettent de mieux définir les zones potentiellement favorables à la recharge de l'aquifère.

Deux sites ont été choisis pour l'implantation des ouvrages destinés à la recharge artificielle de la nappe d'El Maader : **oued Bou Saada et oued Maiter**. Le choix de ces deux sites est effectué en fonction des critères suivants :

- situation à l'intérieur des zones potentiellement favorables ;
- disponibilité de terrain à aménager ;
- origine, potentiel et qualité des eaux destinées à la recharge.

Le site de oued Bou Saada est classé en premier rang en raison de sa situation en zone très favorable à l'infiltration des eaux de surface.

CONCLUSION GENERALE

La recharge artificielle des nappes est une pratique qui vise à augmenter les volumes d'eau souterraine disponibles en favorisant, par des moyens artificiels, son infiltration jusqu'à l'aquifère ; elle fait partie, avec l'utilisation de l'eau de pluie, des eaux usées retraitées et du dessalement de l'eau de mer, des ressources en eau non conventionnelles les plus souvent citées participant à une gestion de l'eau optimisée.

La recharge artificielle est une des mesures qui peut être mise en œuvre pour sécuriser l'approvisionnement en eau, compenser certains effets du changement climatique. Elle ne doit pas remplacer une gestion basée sur la réduction des prélèvements et l'adaptation de ceux-ci à la disponibilité de la ressource

La région d'El Maader au Nord-Est de Bou Saada, qui fait partie du grand bassin versant du Hodna, renferme un aquifère fortement menacé par la surexploitation et les longues périodes de sécheresse.

Le rôle stratégique que joue cet aquifère dans le développement socio-économique de la région impose la mise en place d'urgence d'actions de sauvegarde, de protection et la mise en place de dispositifs de recharge artificielle en vue de restaurer une partie du potentiel hydraulique exploité dans cet aquifère.

La région est soumise à l'influence d'un climat aride à semi-aride caractérisé par une période humide (Décembre, Janvier, Février) et une autre sèche à très sèche (Juin, Juillet, Août). Elle reçoit en moyenne une pluviométrie de l'ordre de 286 mm/an, répartie de façon irrégulière au cours de l'année. La température maximale moyenne mensuelle est de 14°C au mois de janvier et de 40°C au mois de juillet. Le minima est respectivement de 2°C et 24°C.

La nappe d'El Maader appartient au Mio-Pliocène qui affleure largement dans les parties Est de la région de Bou Saada et est largement transgressif sur le Crétacé. L'aquifère est formé par une alternance de grès, d'argile, de marne et de conglomérat et il est drainée par deux Oueds, Bou Saada qui prend naissance dans les monts de Ain ghorab dont la côte se trouve à 1500m et oued Maiter dont le réseau hydrographique prend sa source dans les monts du Djebel Bou Denzir dont le sommet culminant est à la côte 1416m.

La piézométrie a mis en lumière que l'alimentation de la nappe se fait essentiellement par infiltration des eaux de crues, ainsi que l'infiltration des eaux de pluies. A cela, nous pouvons ajouter une alimentation probable en profondeur par les structures encaissantes du crétacé.

L'écoulement souterrain est dirigé vers le Nord en direction du Chott El Hodna, suivant deux axes d'écoulement préférentiels Sud-Ouest Nord Est et Sud Nord.

Le niveau piézométrique dans la région a fortement baissé durant ces dernières années (plus de 40m) à cause de l'exploitation intensive de la nappe par des forages concentrés dans cette zone.

La région d'étude fait partie du grand bassin versant de Chott El Hodna. La seule station hydrométrique existante est sur oued Bou Saada. Celle-ci a vu le jour en 1970 et a cessé de fonctionner en 1978, d'où la rareté des données. L'utilisation des formules empiriques nous a donné un débit maximum entre 700 et 834 m³/s. Lors des fortes crues, les débits peuvent largement dépasser ces valeurs.

L'analyse du terrain nous a permis de proposer trois dispositifs pour la réalimentation de la nappe d'El Maader. Le premier s'appuie sur la réalisation de seuils en gabion ou en béton dans différents endroits des deux oueds (Bou Saada et Maiter). Le second est la réalisation puits filtrants de 10 à 20 mètres de profondeur qui viennent consolider les seuils et favoriser encore plus l'infiltration des eaux de crues. Enfin, le troisième dispositif est l'épandage des eaux sur des surfaces préparées à cet effet.

Nous pensons qu'il est indispensable de procéder à des études plus poussées (hydrogéologiques, géophysiques, hydrochimiques, topographiques, de perméabilité du sol, ...) pour garantir la réussite d'un tel projet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. J. Casanova, M. Cagnimel, N. Devau, M. Pettenati, P. Stollsteiner (BRGM), (2013) : Recharge artificielle des eaux souterraines: état de l'art et perspectives, rapport final,
- [2]. Limam N (2014) : perspectives de développement des ressources en eau dans le bassin du Tensift, Agence du Bassin Hydraulique du Tensift, Royaume du Maroc.
- [3]. Bouimouass H, Boujghad A (2014) : Etude hydrogéologique et hydrologique de la recharge artificielle de la nappe de Haouz au niveau d'oued Zat au sud-est de Marrakech, Mémoire de Licence en sciences et techniques Eau et Environnement, Faculté des sciences et techniques de Marrakech, Département des sciences de la terre, Université Cadi Ayyad –Marrakech, Royaume du Maroc.
- [4]. Mlle Moussajjal N, Boudahk N (2014) : Contribution à l'étude de la recharge artificielle de la nappe du Haouz au niveau de l'oued Ghmat (Bassin de Tensift)
- [5]. Fjldjer F. (1983) : amélioration de la ressource en eau la réalimentation des nappes étude technique, association française pour l'étude des eaux, centre national de documentation et d'information sur l'eau, paris.
- [6]. Mahdade M., Sabir M. (2014) : hydrogéologie aux états unis, article publiée.
- [7]. Ennaji W. (2014) : Etude de la zone favorable pour la recharge artificielle de la nappe phréatique Mnasra, mémoire de Master Sciences et Techniques, option Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux, royaume du Maroc.
- [8]. Helali N. (2016) : Analyse statistique multi variée des eaux souterraines de la région de Bou saâda, mémoire de Master, Option : Hydraulique urbaine, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila.
- [9]. Source: Weather on line statistique.
- [10]. Bennaci M.L., Bentoumi S, Khelfaoui F., Ouahab M. (2009), Rapport de stage en Géologie Bou Saâda, 12 au 19 avril 2009
- [11]. Grine R (2005) : Les perspectives hydrogéologiques de la plaine du Hodna, (wilaya de m'Sila). Mémoire Présenté pour l'obtention du Diplôme de MAGISTER, Université des sciences et de la technologie houari Boumediene.

- [12]. Esquisse géologique de la partie orientale des monts des Oulad Nail (Atlas Saharien, Algérie), Service Géologique de l'Algérie, Alger 1960.J.).
- [13]. Boumezbour A. (2002). Atlas des 26 zones humides algériennes d'importance internationales. DGF.pp22-24. Direction générale des forêts. Alger).
- [14]. Etude d'expertise pour recalibrage et réaménagement d'oued Bou Saada. (nov 2003).
- [15]. Icosium forage & Engineering services (mai 2006). Modélisation du système aquifère du Hodna, Mission 1 : collecte, analyse et synthèse des données. Ministère des ressources en eau agence nationale des ressources hydrauliques.