الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR HYDRAULICS
"The MujahidAbdellah ARBAOUI"

المدرسة الوطنية العليا للري
"المجاهد عبد الله عرباوي"

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option : IRRIGATION ET DRAINAGE

THEME :

Assainissement agricole du périmètre de 335 ha, à M'ziraa (w.Biskra)

Présenté par :
ABDELKRIM Kawther

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
Mme. AZIEZ Ouahiba	MCA	Présidente
Mr. BOUZIANE Omar	MAA	Examinateur
Mr. KHEDIMALLAH Abderrahmane	MCB	Examinateur
Mr. RASSOUL Abdelaziz	Professeur	Promoteur

Session Septembre 2025

Dédicaces

Je partage ma gratitude et ma reconnaissance envers ceux qui ont éclairé mon chemin, même avec un mot qui incarne l'optimisme pour moi…

À ma famille,

merci d'avoir cru en moi même quand je doutais.

À Amel, ma chère sœur,

pour sa présence, ses encouragements et son amour.

À Samiha, ma cousine,

pour ses mots de motivation et sa confiance.

À Wafa, Madjda, et Asma, mes amis proches,

pour les sourires partagés, les moments de doute traversés ensemble, et cette énergie qui m'a portée jusqu'au bout.

Ce travail est le reflet de votre confiance en moi.

MERCI D'AVOIR ÉTÉ LÀ !

ABD EL KRIM Kawther

Avant-propos

Ce mémoire marque l'aboutissement de mon parcours académique au sein de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique, et reflète l'intérêt que je porte aux problématiques liées à la gestion intégrée des eaux. Le choix du thème **Assainissement agricole du périmètre de 335 ha, à M'ziraa (w.Biskra)** s'est imposé au fil de mes études, où ce travail s'articule autour de l'importance de concevoir des systèmes efficaces permettant de diriger et de stocker l'excès d'eau à l'extérieur du périmètre d'irrigation, tout en assurant un drainage adapté pour lutter contre la salinisation à l'intérieur de celui-ci. Dans un pays comme l'Algérie, où les enjeux liés à l'eau sont à la fois techniques et stratégiques, comprendre cette interaction est essentiel pour concevoir des solutions durables.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, **Monsieur RASSOUL Abdelaziz**, s'est investi dans le suivi mon travail avec un intérêt et une grande confiance qui ont été pour moi de très forts encouragements.

Mes remerciements vont également aux responsables de La Direction des Ressources en Eau de la wilaya de Biskra, et tout particulièrement à Monsieur le Directeur, pour les moyens mis à notre disposition et pour l'environnement d'apprentissage stimulant qu'offre cette institution.

Je tiens à remercier chaleureusement les enseignants de l'École Nationale Supérieure de l'Hydraulique (ENSH), pour leurs conseils et leur disponibilité.

Ce mémoire est à la fois une synthèse de mes apprentissages et une contribution modeste à une problématique complexe, que j'espère voir approfondie dans les années à venir.

ملخص :

مُزيرعة بلديةٌ تقعُ شرقَ بسكرة، تتميّزُ بِمناخٍ غير ملائمٍ يعيقُ التّنميةَ المستدامةَ نظرًا لِخصائصها المُناخيةِ الخاصّة، التّي تُسهِمُ في اسْتِنْزافِ مواردِ المِياهِ السّطحيّة. في إطارِ مشروعِ الصّرفِ الزّراعي في مَنطقةِ الدّراسةِ بِمُزيرعة، شُيِّدت قناةٌ للتّحكمِ في الفيَضانات غربًا، بالإضافةِ إلى ذلك، يُنظّم سدٌّ شمالاً تَدفّق المياهِ ويمنعُ الفيَضانات. في هذه البِيئةِ القاحلةِ المرْوِيّة، يُعدُّ الصّرفُ أمرًا حَيَويًّا للزّراعة، إذ يُزيلُ الأملاحَ المتراكمةَ بِسببِ التّبخرِ المُفرَط، مِمّا يُسببُ جفافًا فِسْيولوجيًا لِلمَحاصيل. تُمثّلُ الإدارةُ المُتكامِلةُ لِلمواردِ المَائيّةِ في مُزيرعة نَهجًا يَتضمّنُ مفاهيمَ جمعِ هذا المَوْردِ واسْتِغلالِهُ وحمايَتِه. لِذلك، منَ الضّروري مُواءمةُ وتحسينِ الخُططِ المائيّةِ القِطاعيّةِ المختلفةِ في هذهِ المَنطقةِ الصّحراويّة.

الكلمات المفتاحية : الصّرف الزراعي، قَناة، سَد، الأمْلاح المتراكمة.

Résumé :

M'ziraa est une commune située à l'est de Biskra, c'est caractérisée par un climat défavorable qui ne favorise pas le développement durable en raison de ses caractéristiques climatiques spécifiques qui affecte la diminution des ressources en eaux de surface. Dans le cadre du projet d'assainissement agricole de la zone d'étude située dans M'ziraa, un canal de protection a été aménagé à l'ouest, en complément, un barrage au nord régule les flux d'eau et prévient les inondations. Dans ce milieu aride irrigué, le drainage est vital pour l'agriculture car il permet d'évacuer les sels qui s'accumulent à cause de l'évaporation excessive et qui provoquent la sécheresse physiologique des cultures. La gestion intégrée des ressources en eau dans M'ziraa représente une approche mettant en jeu les notions de mobilisation, d'exploitation et de protection de cette ressource. C'est pourquoi il est fondamental d'accorder et d'optimiser les différents plans sectoriels relatifs aux eaux dans cette région désertique.

Mots-clés : assainissement agricole, canal, barrage, sels accumulés.

Abstract :

M'ziraa is a municipality located in the east of Biskra, it is characterized by an unfavorable climate that hinders sustainable development due to its specific climatic features, which contribute to the depletion of surface water resources. As part of the agricultural sanitation project in the study area located in M'ziraa, a flood control canal was constructed to the west, additionally, a dam to the north regulates water flow and prevents flooding. In this arid irrigated environment, drainage is vital for agriculture as it removes salts that accumulate due to excessive evaporation, causing physiological drought in crops. Integrated water resource management in M'ziraa represents an approach that involves the concepts of mobilization, exploitation, and protection of this resource. Therefore, it is essential to harmonize and optimize the various sectoral water plans in this desert region.

Keywords : agricultural sanitation, canal, dam, accumulated salts.

Table des matières

Introductio générale **1**

1 Présentation de la zone d'étude **2**
1.1 Introduction . . . 2
1.2 Cadre géographique . . . 2
1.2.1 Situation géographique générale . . . 2
1.2.2 Situation et localisation de la zone d'étude . . . 2
1.3 Géologie . . . 4
1.3.1 LE MÉSOZOÏQUE . . . 4
1.3.2 LE TERTIAIRE . . . 5
1.3.3 LE QUATERNAIRE . . . 5
1.4 Etude des parematres climatologiques . . . 6
1.4.1 La température . . . 6
1.4.2 Le vent . . . 7
1.4.3 L'humidité . . . 7
1.5 Les indices climatiques . . . 7
1.5.1 Indice d'aridité de De Martoone . . . 7
1.5.2 Quotien pluvio-thermique . . . 8
1.5.3 Classification du climat selon l'indice de Bagnouls et Gaussen . . . 9
1.6 Réseau hydrographique . . . 10
1.7 Conclusion . . . 11

2 Présentation de la source en eau et en sol **12**
2.1 Introduction . . . 12
2.2 Hydrogéologie de la zone d'étude . . . 12
2.2.1 Les eaux souterraines . . . 12
2.2.2 Les eaux superficielles . . . 13
2.2.3 Caractéristiques physico-chimique des eaux du barrage . . . 14
2.3 Classifications de l'eau d'irrigation . . . 14
2.3.1 La conductivité électrique . . . 14
2.3.2 Le SAR (Sodium Adsorption Ratio ou Rapport d'Adsorption de Sodium . . . 15
2.3.3 lnterprétation des résultats . . . 16
2.4 Les analyses chimiques du sol . . . 16
2.5 Les caractéristiques du sol . . . 17
2.6 Résultats des analyses physico-chimiques du sol . . . 18
2.7 Les travaux d'amélioration et de mise en valeur . . . 19
2.8 Élaboration des cartes des zones homogènes . . . 19
2.9 Conclusion . . . 21

3 Assainissement agricole **22**
3.1 Introduction . . . 22
3.2 Définitions . . . 22
3.3 Causes de l'excès d'humidité du sol . . . 22
3.4 Phases de l'assainissement agricole . . . 22
3.5 Étude morphologique . . . 23
3.6 Etude géomorphologique . . . 24
3.6.1 Caractéristiques morphologiques . . . 24
3.6.2 Caractéristiques géométriques . . . 24
3.7 Etude du relief . . . 25
3.7.1 L'altitude maximale et minimale H_{max} et H_{min} . . . 25
3.7.2 La pente du bassin versant . . . 25
3.7.3 Indice de pente moyenne . . . 26
3.8 Etude du réseau hydrographique . . . 26
3.8.1 Densité de drainage 'D_d' . . . 26
3.8.2 Temps de concentration 'T_c' . . . 26
3.8.3 Vitesse de ruissellement . . . 26
3.9 Calcul et dimensionnement des ouvrages . . . 27
3.9.1 Choix du site de la retenue . . . 27
3.9.2 Topographie de la retenue . . . 28
3.9.3 Étude de la crue . . . 29
3.9.4 Capacité de la retenue colinéaire . . . 30
3.9.5 Calculs de la digue en terre . . . 33
3.9.6 Dérivation des eaux selon un régime spécifique . . . 35
3.9.7 Dimensionnement du cannal . . . 38
3.10 Le drainage agricole . . . 40
3.10.1 Les systèmes de drainage . . . 41
3.10.1.1 Système en arête de poisson . . . 42
3.10.1.2 Système parallèle . . . 42
3.10.2 Types de drain . . . 43
3.10.3 Les objectifs de drainage . . . 43
3.10.4 L'impact du drainage sur l'hydrologie et l'écologie . . . 44
3.10.4.1 Limiter l'impact du drainage sur l'hydrologie . . . 45
3.10.4.2 Limiter l'impact du drainage sur la qualité des eaux . . . 45
3.11 Conclusion . . . 45

4 Besoin en eau des cultures **46**
4.1 Introduction . . . 46
4.2 L'occupation des sols . . . 46
4.2.1 Rotation et assolements . . . 47
4.3 Calcul de la pluie efficace . . . 47
4.4 L'aspect cultural . . . 48
4.4.1 Les profondeurs racinaires des cultures . . . 48
4.4.2 L'Estimation des coefficients culturaux 'K_c' . . . 48
4.5 L'aspect climatique . . . 49
4.5.1 Types d'évapotranspiration en agriculture . . . 49
4.5.2 Méthode d'évaluation de l'évapotranspiration . . . 50
4.5.3 Calcul de l'évapotranspiration référence 'ET_0' . . . 52

4.6 L'aspect pédologique . . . 52
4.6.1 L'humidité du sol et le potentiel hydrique . . . 52
4.6.2 Calcul de la réserve en eau du sol . . . 53
4.7 Evaluation des besoins en eau . . . 55
4.7.1 Les besoins nets des cultures choisies . . . 55
4.8 Calcul du débit fictif continu moyen, et du début caractéristique . . . 62
4.9 La fréquence et l'espacement d'arrosage . . . 63
4.10 Lessivage . . . 64
4.10.1 Tolérance des cultures aux sels . . . 64
4.10.2 Bilan de salinité et besoin en lessivage . . . 64
4.10.3 Le début a évacuer dans le cas où l'excès d'eau provient du lessivage . . . 66
4.11 Estimation des volumes d'eau d'irrigation . . . 66
4.12 Conclusion . . . 67

5 Dimensionnement, et Diagnostic de l'efficacité du réseau de drainage 68
5.1 Introduction . . . 68
5.2 La base de calcul d'un réseau de drainage . . . 68
5.3 Elaboration d'un projet de drainage par aqueduc enterré . . . 69
5.3.1 Relevé topographique . . . 69
5.3.2 Direction et pente des drains . . . 69
5.3.3 Détermination des diamètres des drains : . . . 70
5.3.4 Ecartement des drains . . . 70
5.4 Le dimensionnement du réseau de drainage pour lutter contre la salinisation . . . 78
5.4.1 Calcul de l'écartement entre les drains . . . 78
5.4.2 Profondeur des drains . . . 79
5.4.3 La pente d'installation . . . 79
5.4.4 Débit à évacuer par le drain . . . 82
5.4.5 Dimensionnement des drains . . . 82
5.4.6 Dimensionnement des collecteurs . . . 82
5.5 Efficacité du drainage . . . 82
5.5.1 Situation 1 : Mauvais rendement dans l'ensemble du champ et peu ou pas de variation de rendement sur et entre les drains . . . 83
5.5.2 Situation 2 : Mauvais rendement dans une petite partie du champ . . . 83
5.5.3 Situation 3 : Mauvais rendement dans une grande partie du champ et rendement meilleur au-dessus des drains qu'entre les drains . . . 83
5.6 Diagnostic de l'efficacité du système de drainage souterrain . . . 84
5.6.1 Observation du débit à la sortie du drain . . . 84
5.6.2 Suivi de la nappe . . . 84
5.6.3 Observation du profil de sol . . . 86
5.6.4 Vérification du système de drainage . . . 86
5.7 Conclusion . . . 86

6 Organisation du chantier, et Sécurité au travail 87
6.1 Introduction . . . 87
6.2 Présentation d'un chantier de drainage . . . 87
6.2.1 Le matériel . . . 87
6.2.2 Les engins de chantier des terrassements . . . 89
6.2.3 Les équipements de terrassement . . . 92
6.2.4 Les postes de travail . . . 93

6.3 Préparation du chantier . . . 93
6.4 Période de placement des drains . . . 94
6.5 Ordonnancement des travaux . . . 95
6.6 Déroulement du chantier de drainage . . . 96
6.6.1 Aménagement de Brise-vents . . . 96
6.6.1.1 Le type du prise-vent projeté . . . 96
6.6.1.2 Caractéristiques physiques du prise vent projeté . . . 96
6.6.2 Modes d'exécution appropriés des travaux de terrassement . . . 97
6.7 Évaluation de la rentabilité . . . 99
6.8 Devis contitatif et estilatif . . . 102
6.9 Ergonomie dans un chantier de terrassement . . . 102
6.9.1 Les acteurs de la prévention des risques professionnels au niveau national . . . 103
6.9.2 Cadre Réglementaire Fondamental . . . 103
6.9.3 Evaluation des risques . . . 103
6.9.3.1 Identifier les dangers . . . 103
6.9.3.2 Mettre en place des mesures de prévention ou de intervention . . . 103
6.10 Conclusion . . . 106

Conclusion général **107**

Annexes **108**
.1 Fiche des analyses des eaux . . . 108
.2 Résultats analytiques du profil 10 . . . 108
.3 Valeurs de la profondeur équivalente 'd' de Hooghoudt en fonction de l'espacement 'L'et de la profondeur de la couche imperméable'D'. . . . 109
.4 Méthodologie pour faire suivi de la nappe . . . 109

Table des figures

1.1 La localisation géographique de la zone d'étude dans la commune de M'ziraa (w.Biskra) 3
1.2 Plan de situation de la zone d'étude à M'ziraa (W. Biskra) 4
1.3 Carte d'esquisse géologique de la wilaya de Biskra [8]. 6
1.4 Températures moyennes des minima, des maxima, des moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période 2000-2019 (O.N.M). 7
1.5 Humidité relative moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (2000-2019) (O.N.M). 7
1.6 Localisation de la région de Biskra sur le climagramme d'Emberger. 9
1.7 Diagramme Ombrothermique de Biskra 9
1.8 Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra 10

2.1 Localisation de la commune de M'ZIRAA, barrage de MESTAOUA et les périmètres d'irrigation existants 13
2.2 Diagramme de classification des eaux d'irrigation (selon USSL, 1954) 16
2.3 Les profils de sol numérotés à 1 jusqu'à 7 17
2.4 La carte des zones homogènes selon les taux de calcaire 20
2.5 La carte des zones homogènes selon la pierrosité 20

3.1 Carte des bassins versants adjacents au périmètre d'irrigation 23
3.2 Courbes Cumulées Surface-Volume en Fonction des Cotes 28
3.3 Hydrogramme de la crue 30
3.4 Profil en travers du canal de protection 38
3.5 Coupe transversale d'un canal trapézoïdal. 39
3.6 Projection des différents constituants d'un réseau de drainage [4] 41
3.7 Motifs de drainage naturel et ses structures géologiques 42
3.8 Représentation schématique d'un réseau de drainage en arrête de poisson (a) et parallèle (b) 42
3.9 Les différents types de drains :1-Drain en teree cuite, 2-Drain en ciment, 3-Drain à double paroi. 43
3.10 Impact de la salinité du sol sur l'absorption d'eau par les plantes 44
3.11 Connexion réseau de drainage et fossé d'assainissement agricole [15] 45

4.1 Le Concept de l'Évaportranspiration de Référence ET_0 et de l'Évaportranspiration Maximale ETM en agriculture. 50
4.2 Station agrométéorologique avec lysimètres et bacs d'évaporation. 51
4.3 Variabilité d'humidité du sol en fonction de la classe texturale [9] 53
4.4 Relation entre la teneur en eau du sol et le potentiel hydrique (Capacité au champ, Point de flétrissement). 54
4.5 Le flux d'eau de la racine à la feuille chez les plantes 55

4.6 Représentation classique des composantes du bilan hydrique d'un système sol-plante. 56
4.7 Impact des ions du sodium (Na^+) sur la dispersion de l'argile et la perméabilité du sol 64

5.1 Représentation schématique de l'écoulement des eaux depuis la surface du sol vers un drain souterrain. 69
5.2 Représentation schématique des principales variables pour la mise en place d'un réseau de drainage 70
5.3 Modélisation d'un écoulement souterrain dans une nappe libre [10] 72
5.4 Ecoulement effectif et schématisé vers des drains ne Ecoulement effectif et schématisé vers des drains ne reposant pas sur un substratum étanche [10] 73
5.5 Analogie de Hooghoudt [10] 75
5.6 Drains posés sur une couche imperméable en phase de tarissement [10] 76
5.7 Modélisation de l'écoulement horizontal d'une nappe en régime variable vers un fossé de drainage 77
5.8 Coupe géologique synthétique de la wilaya de Biskra [8] 79
5.9 Relief et topographie - Secteur M'ziraa (55 hectares). 80
5.10 Exemple de l'effet d'un drain sur le développement des cultures [1] 84
5.11 Courbes d'une nappe qui se rabat rapidement après qu'une pluie ait fait remonter cette nape. Les trois courbes représentent la position de la nappe à la fin de sa remontée lorsque celle-ci atteint la surface, 24 heures et 48 heures plus tard [1] 85
5.12 Courbes d'une nappe qui se rabat plus lentement pour une même situation initiale [1] 85
5.13 Lignes de dépression de la nappe phréatique entre deux drains [1] 85

6.1 Système de contrôle de profondeur par laser rotatif 89
6.2 Rétracaveuse 90
6.3 Installation d'un système de drainage avec une trancheuse spécialisée 90
6.4 Machine de forage sans tranchée (Trenchless) 91
6.5 Charrue taupe pour terre franche et roches (à gauche), et Charrue taupe pour terre noire (à droite) 92
6.6 Technique du sous solage afin d'améliorer l'aération 92
6.7 Excavation latéral à l'aide d'un godet cribleur (à gauche), et Excavation longitudinale l'aide d'un godet de curage [11] 93
6.8 Excavation longitudinale dans un sol organique (à gauche), et dans un sol minéral (à droite) [11] 93
6.9 La méthode des 5M [3] 94
6.10 Image 3D représente le périmètre après l'installation de prise vent 97
6.11 La structure correcte pour exécuter les fossés [11] 97
6.12 Évitement de recreuser (curage) un cours d'eau naturel ou d'y jeter des fossés secondaires [11] 98
6.13 Détail de Raccordement de Fossés pour éviter la tourbilance [11] 98
6.14 Detail de raccordement daux fossés secondaires à un collecteur principal (piquage) [11] 99
6.15 L'influence de la profondeur des drains sur le contrôle de la nappe 100
6.16 Représentation schématique d'une nappe perchée temporaire en situation non drainée (à gauche) et drainée par tuyaux enterrés (à droite) 100
6.17 La ceinture est votre meilleur bouclier 105
6.18 Équipements de Protection Individuelle (EPI) en hiver et en été, sur chantier de drainage [3] 106
19 Positionnement des puits par rapport aux drains(à gauche), et La sonde à drain (à droite) [1] 110

20 Tige graduée avec la sonde au bout (à gauche), et tuyau prolongé d'un embout en plastique (à droite) [1] 111

Liste des tableaux

1.1 Les limites des climats selon l'indice de De Martoone 8

2.1 Résultats d'analyse physico-chimiques de l'eau du barrage de Mestaoua destinée à l'irrigation du périmètre 14
2.2 Classification des eaux en fonction de la conductivité électrique.Source : United States Salinity Laboratory (U.S.S.L.), 1954 14
2.3 Classification des eaux en fonction du SAR. 15

3.1 Synthèse des Mesures Topographiques (ou Bathymétriques) 28
3.2 Les débuts lors de la montée de la crue pour la fréquence 1% 29
3.3 Les débuts lors de la décrue de la crue pour la fréquence 1% 29
3.4 La somme des apports qui entrent dans la retenue 31
3.5 La somme des pertes par évaporation, infiltration, et des besoins sortants de la retenue 32
3.6 Bilan hydraulique mensuel de la retenue 32
3.7 Valeurs comparées de Hv, V et R selon la formule utilisée 33
3.8 Valeur des pentes pour digues en terre. 34
3.9 Les caractéristiques de la retenue et sa digue en terre 35
3.10 Récapitulatif des paramètres du canal de protection 40

4.1 Les cultures et ses pourcentages proposés pour la zone 1 46
4.2 Les cultures et ses pourcentages proposés pour la zone 2 47
4.3 Les Assolements 47
4.4 Les pluies efficaces en mm 48
4.5 Les profondeurs d'enracinements des différentes cultures 48
4.6 Coefficients culturaux 'Kc' des principales cultures 49
4.7 Données Climatiques Mensuelles 52
4.8 Besoins en eau de L'Oignon 57
4.9 Besoins en eau de Haricot vert 57
4.10 Besoins en eau du Piment et Poivrant 58
4.11 Besoins en eau du Tomate 58
4.12 Besoins en eau de Courgette 59
4.13 Besoins en eau de l'Orge vert 59
4.14 Besoins en eau du Blé tendre + dure 60
4.15 Besoins en eau de la Pomme de terre 60
4.16 Besoins en eau de l'Olivier 61
4.17 Besoins en eau en mm pour l'assolement 1. 61
4.18 Besoins en eau en mm pour l'assolement 2 62
4.19 Doses de lessivage en mm 65
4.20 Volume totale pour l'assolement 1 66

4.21 Volume totale pour l'assolement 2 66
4.22 Récapitulatif des résultats concernant les besoins en eau et le lessivage 67

5.1 Profil longitudinal du Canal Principal - Échantillonnage tous les 30 m 81

6.1 Les valeurs typiques de α pour différents matériaux 88
6.2 Principales caractéristiques des machines de drainage [5] 89
6.3 La langueur et le nombre des arbres pour la prise-vent 97

Introduction générale

Depuis longtemps, les ressources en eau ont connu le principe de développement agricole dans les régions sahariennes , parce que les conditions climatique du Sahara proprement dit sont bien connues ; l'aridité du milieu fait que les températures deviennent plus contrastées à tous les mois, et la pluviométrie est très faible, toutes ces conditions climatique rendent impossible toute pratique agricole sans irrigation. Dans les dernière années, le phénomène de pollution de la nappe phréatique a fait un apparition, et le niveau des eaux baisse à cause du gaspillage dans le réseau d'alimentation en eau potable ou le réseau d'irrigation, alors il faut mettre en place une stratégie c'est pourquoi.

Les connaissances sur un processus doivent être remplacées dans l'imbrication des échelles d'étude (système local, parcelle, bassin versant), et des visions de l'aménagement (objectifs opérationnels, contraintes de sécurité, d'environnement, aléas hydrologiques), il est présenté l'approche méthodologique d'une démarche d'aménagement visant à réduire les impacts d'activités humaines d'une part et à prévenir du risque des aléas d'autre part. Dans le cadre du projet d'assainissement agricole, un canal de protection a été aménagé à l'ouest, en complément, un barrage au nord régule les flux d'eau et prévient les inondations. Dans ce milieu aride irrigué, L'évacuation de l'excès d'eau d'un sol cultivée est l'un des objectifs les plus importants du drainage, mais il génère toutefois des impacts négatifs sur les milieux naturels qu'il est important de comprendre pour faire évoluer les techniques vers une meilleure prise en compte des enjeux environnementaux.

Ce mémoire s'articule suivant huit chapitres qu'ils sont traités successivement, le premier chapitre est consacré à une présentation de la zone d'étude, le deuxième et le troisième chapitres se consacrent respectivement à la source en eau et la source en sol, le quatrième chapitre traite du thème de l'assainissement des sols et son importance dans la protection globale de la zone de M'ziraa, le cinquième chapitre consècre aux besoins en eau des cultures choisées à savoir les assolement appropriés. Cela a été suivi par le sixième chapitre qui met en évidence les types des systèmes de drainage et leur impact à court et long terme. Ce chapitre a été complété par la dimensionnement du système de drainage afin d'évacuer les excès en sel, ainsi que l'étude de l'efficacité du réseau de drainage, et le dernier chapitre est consacré à l'organisation du chantier et à la sécurité au travail, que ce soit sur un chantier des travaux de drainage ou sur un chantier de terrassement en général.

Chapitre 1

Présentation de la zone d'étude



1.1 Introduction

La région de Biskra constitue une des zones les plus franches de transition entre les domaines atlasiques montagneux, et les étendues plates et désertiques du Sahara, et ce chapitre consiste à analyser et à évaluer la situation de cette milieu physique , et identifier ses différentes composantes (Topographie, Climat, Hydrologie, Hydrogéologie et Géologie...).

1.2 Cadre géographique

Biskra est une wilaya située dans la partie Sud Est de l'espace de programmation territoriale, également dans la partie septentrionale du Sahara entre 4° et 7° de longitude Est, et 35° et 36° de latitude Nord.

Elle est issue du découpage administratif de 1974 et couvre 33 communes, réparties en 12 Daïras, et sa population est estimée en 2010 à 775.000 hab.

1.2.1 Situation géographique générale

La wilaya s'étend sur une superficie de 21 510 km^2, elle est délimitée par les wilayas de :

- Batna au Nord.
- Khenchela au Nord Est.
- M'Sila au Nord-Ouest.
- Ouargla au Sud.
- El-Oued au Sud-Est.
- Djelfa au Sud-Ouest.

1.2.2 Situation et localisation de la zone d'étude

M'Ziraa est une zone désertique de transition entre les montagnes de l'Atlas au nord (l'Algérie méditerranéenne), et la zone saharienne du désert du Sahara au sud (l'Algérie saharienne). L'accident

sud-atlasique, également appelé flexure saharienne, sépare deux zones distinctes tant sur le plan géomorphologique que géologique.

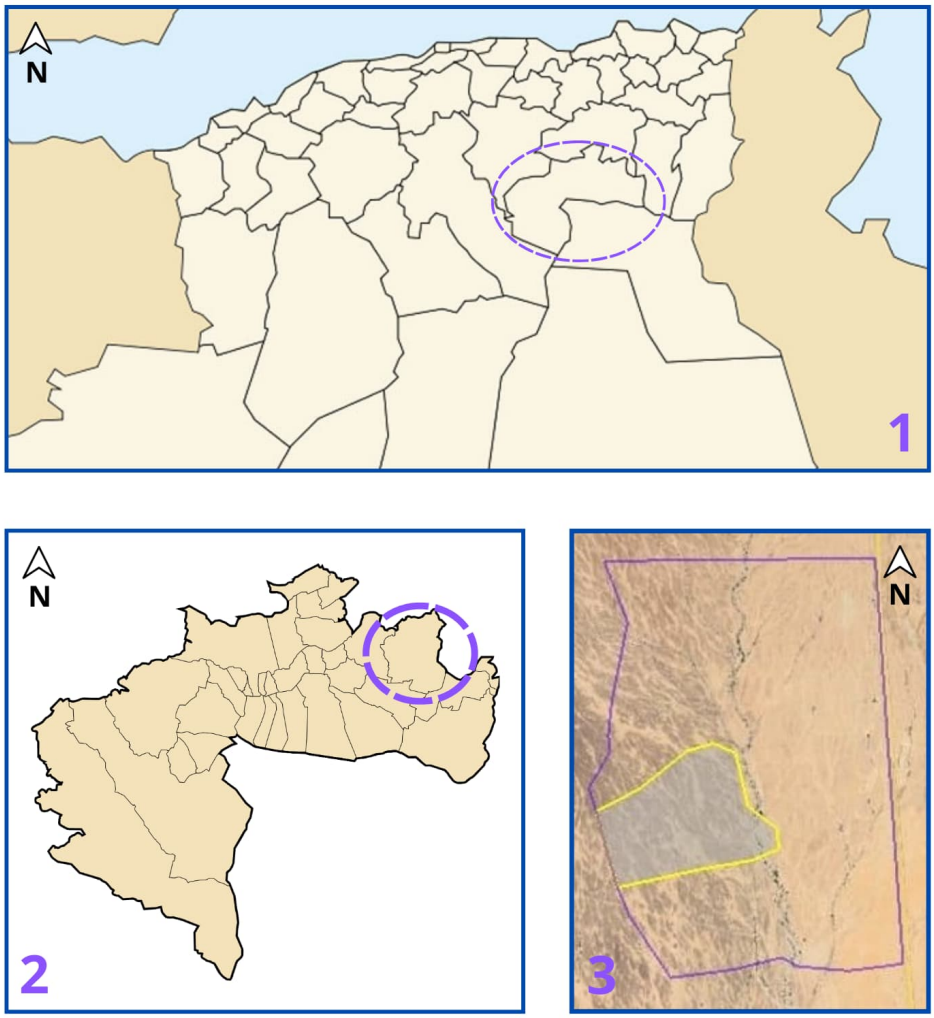


FIGURE 1.1 – La localisation géographique de la zone d'étude dans la commune de M'ziraa (w.Biskra)

□ **Source : Google Earth.**

• La commune de M'ZIRAA fait partie de la daira de Zeribet El Oued, elle est située à l'Est de la wilaya de Biskra, dans le massif de l'Aures. Elle est délimitée par :

- T'kout (wilaya de Batna) au Nord Est.
- Ghassira (wilaya de Batna) au Nord Ouest.
- Kimmel (wilaya de Batna) au Est.
- M'chouneche au Ouest.
- Zeribet El Oued au Sud Est.
- Ain Naga au Sud Ouest.

• Également, les coordonnées géométriques de M'ZIRAA sont :

- 34° 43' 18.85" N de latitude.

- 06° 17' 34.37" E de longitude.

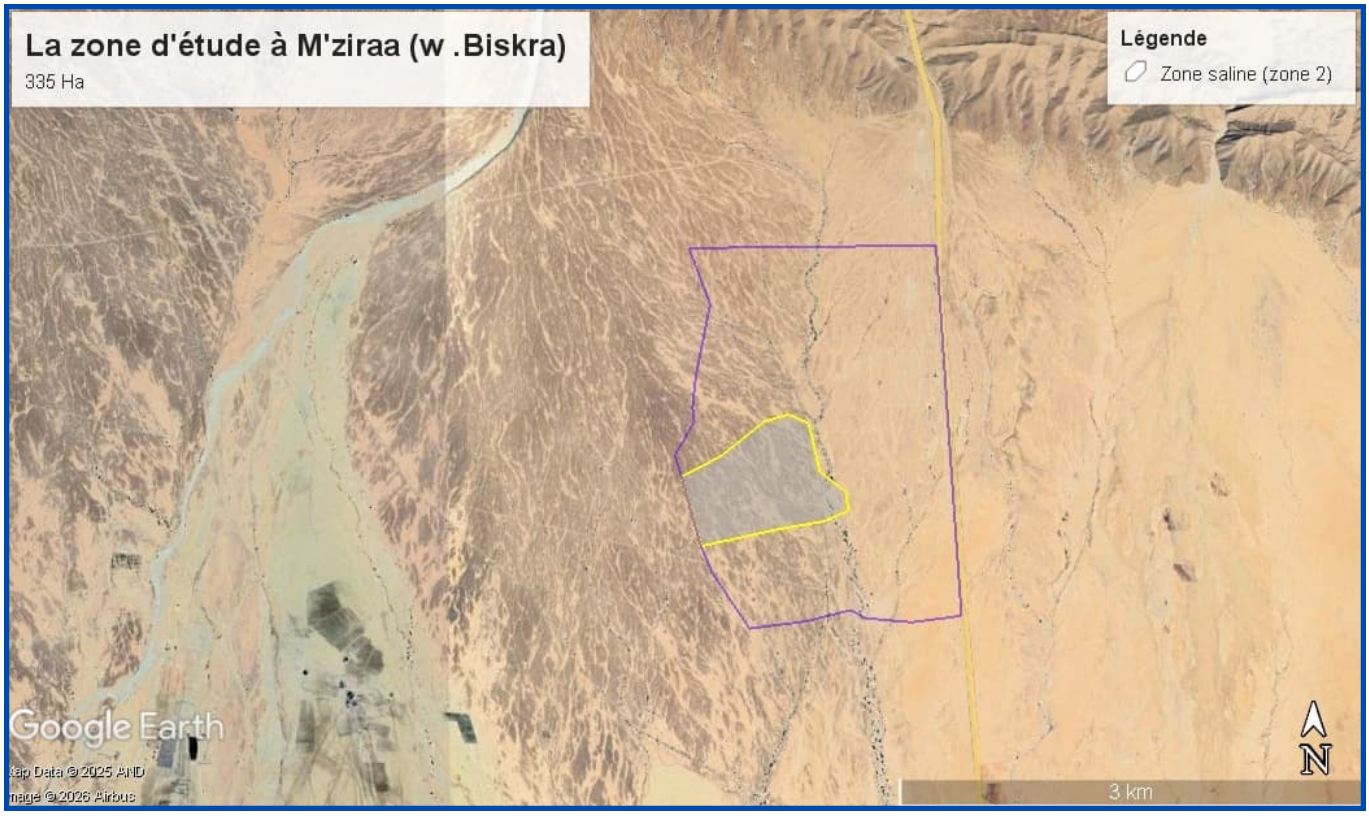


FIGURE 1.2 – Plan de situation de la zone d'étude à M'ziraa (W. Biskra)

□ **Source : Google Earth pro**

1.3 Géologie

Le relief de la région de Biskra est constitué de trois formations, ce sont :

1.3.1 LE MÉSOZOÏQUE

Il est constitué de terrains crétacés où domine une sédimentation argilo-carbonatée.

A. LE TRIAS : il est formé d'argiles gypsifères et salifères à cristaux d'aragonite, d'anhydrite, de quartz bipyramidé ou encore d'hématite dus à des transformations secondaires et englobantes des amas de roches diverses de l'ensemble de la couverture post-triasique.

B. LE JURASSIQUE : il est composé de sédiments marins et lagunaires.

C. LE CRÉTACÉ : il ya deux séries dans ce formation : une série gréseuse basale du Crétacé inférieur (Berriasien - Albien), et une série marno-calcaire sommitale du Crétacé supérieur (Cénomanien – Maestrichtien).

a. Le Crétacé inférieur : l'atlas saharien oriental dans la région comprise entre le Hodna et les Aurés correspondait au prolongement septentrional de la plate-forme saharienne.

a.1. Le Barrémien : se compose d'une mégaséquence argilo-gréseuse continentale et d'alternance de calcaires plus ou moins dolomitiques dans l'atlas saharien

a.2. L'Aptien : l'Aptien se termine par une barre calcaro-dolomitique dans l'Atlas saharien.

a.3. L'Albien : dans l'atlas saharien, l'albien inférieur est argilo-gréseux, alors que l'Albien supérieur est calcaro-dolomitique. Au sud dans la plate-forme saharienne il est constitué en grande partie par des grès et des intercalations d'argiles.

b. Le Crétacé supérieur : ses dépôts correspondent à un cycle sédimentaire marin qui se caractérise par l'alternance des formations dolomitiques, calcaires, et des dépôts argilo-marneux contenant parfois du gypse ou de l'anhydrite.

b.1. Le Cénomanien : dans l'Atlas saharien, le Cénomanien inférieur et moyen est marneux ou marno-calcaire, avec des dépôts lagunaires (gypses et anhydrites).

b.2. Le Turonien : il est composé par des calcaires cristallins, calcaires marneux et des calcaires dolomitiques au pied sud des Zibans.

b.3.Le Sénonien : il est composé d'une sédimentation marno-calcaire à lumachelles.

1.3.2 LE TERTIAIRE

A. L'Éocène :

• l'Éocène inférieur est composé d'une succession de bancs calcaires cristallins durs blancs ou gris, de calcaires crayeux, de dolomies argileuses et de marnes, quelques passées de gypses.

• L'Éocène moyen est composé des argiles, des gypses, des anhydrites et des calcaires dolomitiques.

• L'Éocène supérieur est composé de marnes argileuses et d'une alternance de passées gréseuses.

B. Le Miocène : ses formations affleurent principalement au niveau des plaines et des piémonts.

C. Le Pliocène : dans El Outaya, il est composé de poudingues, de grès et de conglomérats à ciment marno-gréseux. Au pied des monts du Zab, le Mio-Pliocène est composé de poudingues, bancs de grès et argiles sableuses. Au sommet, une croûte calcaréo-gypseuse de quelques mètres d'épaisseur, c'est la croûte saharienne qu'elle recouvre les anciennes formations.

1.3.3 LE QUATERNAIRE

A. Les Terrasses anciennes : elle est formée de poudings remplacés progressivement par un dépôt sableux et argileux vers le sud de Biskra.

B. Le Quaternaire Moyen : c'est une formation calcareu- gypseuse atteignant jusqu'à deux mètres d'épaisseur, elle occupe les contours des montagnes qui présentent des flancs calcaires, des travertins de sources anciennes qui datent aux environs des sources Oumach, Mlili et Megloub. Les sources actuelles sondent au-dessous des anciens dépôts travertineux.

C. Le Quaternaire actuel : ce sont des éboulis et les cailloutis aux pieds des montagnes et sur les pentes, des dunes et des alluvions sableuses et caillouteuses dans les lits des oueds.

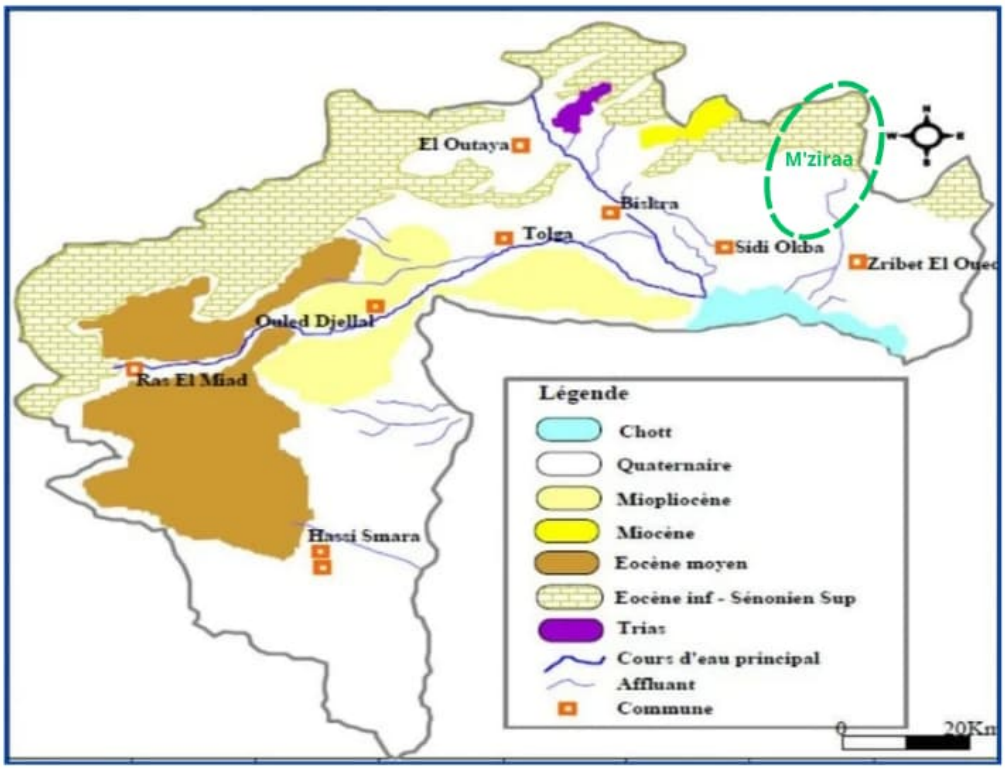


FIGURE 1.3 – Carte d'esquisse géologique de la wilaya de Biskra [8].

1.4 Etude des parematres climatologiques

Les parematres climatologiques sont des grandeurs mesurables de l'atmosphère utilisées pour définir les caractéristiques physiques du climat d'une région, notamment pour la classification bioclimatique.

1.4.1 La température

Durant la période (2000-2019), les températures moyennes maximales les plus élevées dans la région du Biskra sont enregistrées durant la période estivale (Juin, Juillet et Août), alors que la plus basse est celle du mois de Janvier (7.5°C).

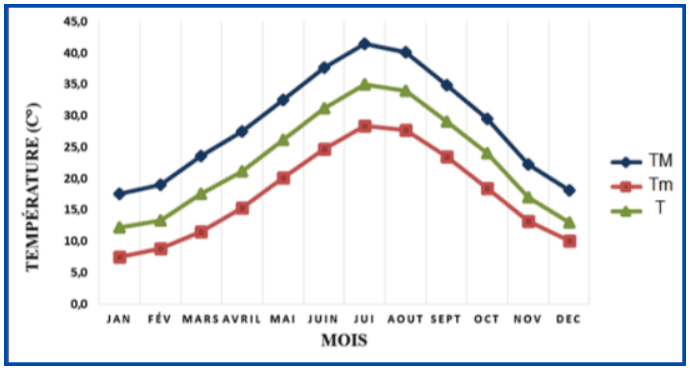


FIGURE 1.4 – Températures moyennes des minima, des maxima, des moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période 2000-2019 (O.N.M).

1.4.2 Le vent

Les vents dominantes dans M'ziraa sont de direction Nord-Ouest et Sud-Est, avec une vitesse moyenne mensuelle de 15.52 km/h ; c'est une vitesse modérée (12-19 km/h), et selon la classification des vents (échelle de Beaufort), leur effet remue les petites branches, donc il ne pose pas un grande problème pour l'agriculture.

1.4.3 L'humidité

C'est le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air humide et la pression de saturation à la même température. L'humidité relative moyenne mensuelle durant la période (2000-2019) est de 42.9%. On note un faible taux d'humidité de l'air même à l'ombre qui peut descendre jusqu'à 26.6 au mois de juillet, cela s'explique par l'aridité du climat et la concentration des masses d'air chaud du Sahara.

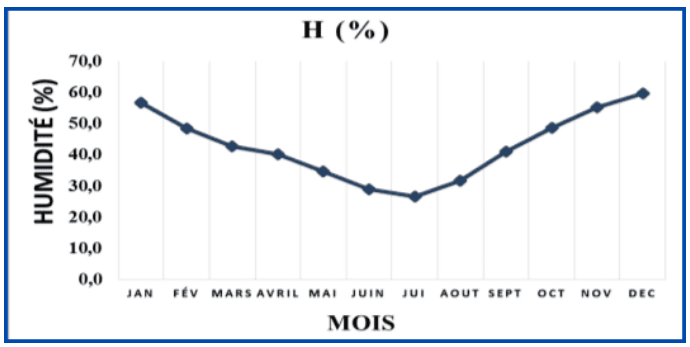


FIGURE 1.5 – Humidité relative moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période (2000-2019) (O.N.M).

1.5 Les indices climatiques

1.5.1 Indice d'aridité de De Martoone

L'indice de De Martoone est un indicateur quantitatif du degré du manque d'eau présente à une région, autrement dit, cela permet de déterminer le degré d'aridité à cette région. L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé cinq grands types

de macroclimats allant des zones désertiques arides (I < 5) aux zones humides à forêt prépondérante (I > 30). Les limites des climats sont donnée dons le tableau ci-dessous :

TABLE 1.1 – Les limites des climats selon l'indice de De Martoone

Valeur de l'indice d'aridité	**Type de climat**
$I < 5$	Désertique
$5 < I < 10$	Très sec (aride)
$10 < I < 20$	Sec (semi-aride)
$20 < I < 30$	Relativement humide (subhumide)
I > 30	Humide

L'indice d'aridité est donné par l'expression :

$$I_A = \frac{P}{T + 10} \tag{1.1}$$

- P : précipitation annuelle en (mm), sa valeur est égale à 142.96 mm.
- T : température moyenne annuelle en (°c), sa valeur est égale à 22.57°C.

Donc : $I_A = \frac{142.96}{22.57+10} = 5.03$

Selon la classification de MARTONNE (Tableau1.1), le climat est très sec, ce qui rend l'irrigation indispensable.

1.5.2 Quotien pluvio-thermique

Le Quotient Pluviothermique d'Emberger 'Q_2' est l'indice hydrothermique le plus détaillé utilisé pour caractériser les climats méditerranéens et déterminer leurs étages bioclimatiques.

La formule de Stewart est une simplification de la formule originale du Quotient Pluviothermique d'Emberger 'Q_2', alors que l'objectif était de permettre l'utilisation des températures directement en degrés Celsius ($°C$) au lieu des Kelvins (K), en absorbant la conversion et d'autres constantes dans un facteur unique. La formule de Stewart pour le Quotient Pluviothermique ' Q_3' est :

$$Q_3 = 3.43 \times \frac{P}{M - m} \tag{1.2}$$

- P : précipitations annuelles moyennes (mm) ;
- M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (°C).
- m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid (°C).
- 3,43 : constante qui remplace l'opération complexe au dénominateur de la formule originale d'Emberger (impliquant la conversion en Kelvins et les carrés).

D'après les données climatiques de la région de Biskra (2000-2019) : $Q_3 = 3.43 \times \frac{131}{41.4-7.5} = 13.3$

Le climagramme de la région de Biskra durant la période 2000-2019 avec une 'Q_3' égale à 13,3, révèle que cette zone située dans l'étage Saharien a un climat chaud et sec. En effet, la région présente une moyenne de précipitations annuelles relativement faibles, atteignant 131,4 mm, par ailleurs, la température annuelle moyenne de la région est élevée, atteignant 29,5°C.

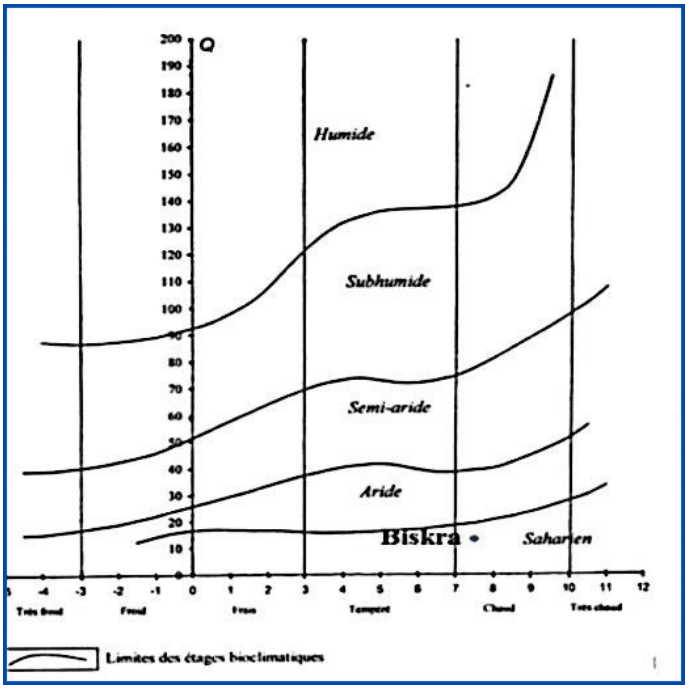


FIGURE 1.6 – Localisation de la région de Biskra sur le climagramme d'Emberger.

1.5.3 Classification du climat selon l'indice de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme Ombrothérmique permet d'estimer les éléments de climat d'une région de points de vue précipitation et température pendant une période, et permet de préciser les périodes sèches et humides.

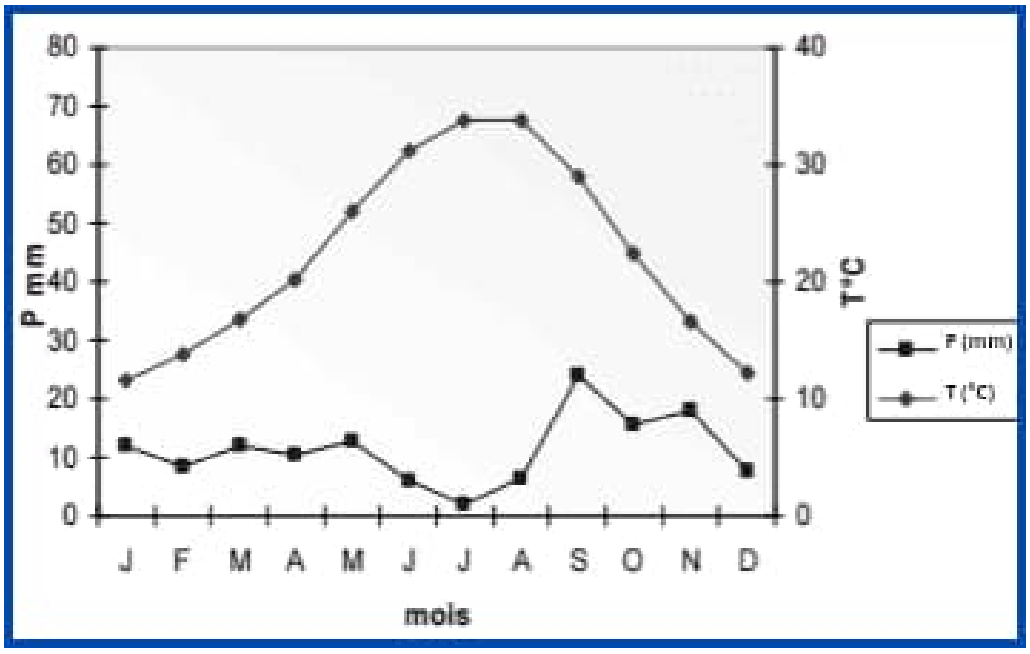


FIGURE 1.7 – Diagramme Ombrothermique de Biskra

D'après ce diagramme, la période sèche est presque pendant toute l'année! . Le diagramme Ombrothermique précédent montre que la zone d'étude est caractérisée par un climat chaud toute

l'année ! ce qui indique que les précipitations de l'année la plus sèche sont proches de celles des autres années normales.

1.6 Réseau hydrographique

Le réseau est structuré autour de plusieurs cours d'eau majeurs qui drainent les eaux provenant des reliefs du Nord (Atlas saharien) vers les zones basses du Sud, , où l'eau est soit captée par des barrages, soit perdue par évaporation dans les chotts, entraînant des problèmes de salinité.

La carte différencie les oueds importants (traits épais), on distingue nettement l'Oued Biskra au centre, l'Oued Djedi (l'un des plus longs d'Algérie) qui traverse la partie ouest et sud, ainsi que l'Oued El Arab à l'Est, aussi on distingue des oueds secondaires (traits fins), illustrant un réseau de drainage dense mais souvent saisonnier (écoulement torrentiel après les pluies).

La carte présente des lignes d'isohyètes (courbes de même niveau de précipitations) graduées (200 mm, 300 mm, 400 mm). On observe un gradient pluviométrique décroissant :

- Le Nord de la wilaya reçoit les précipitations les plus élevées (jusqu'à 400 mm).
- Le Sud s'enfonce dans l'aridité avec des valeurs descendant en dessous de 200 mm.

À l'extrémité Sud-Est, la zone hachurée représente le Chott, un point bas où convergent les eaux de ruissellement. En raison de l'évaporation intense dans cette région, ces zones deviennent souvent des réceptacles de sel, ce qui explique la présence de zones salines comme M'ziraa.

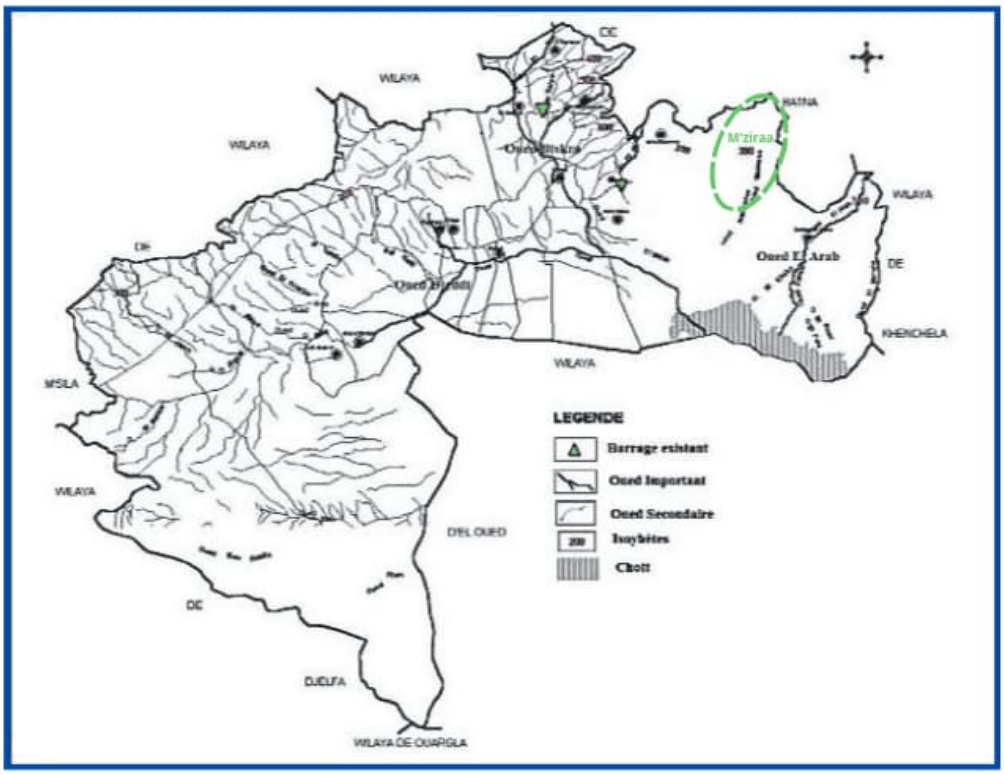


FIGURE 1.8 – Carte du réseau hydrographique de la wilaya de Biskra

□ **Source : biblio.univ-annaba.dz**

1.7 Conclusion

La région de M'ziraa, située dans la wilaya de Biskra, connaît un climat saharien marqué par des températures très élevées en été, une faible pluviométrie et une forte évaporation. Ces conditions arides favorisent l'accumulation des sels dans les sols et accentuent la salinité des eaux de drainage. En effet, l'irrigation pratiquée dans ce milieu semi-aride mobilise des ressources hydriques souvent chargées en sels, et l'absence de précipitations suffisantes limite le lessivage naturel des sols.

Chapitre 2

Présentation de la source en eau et en sol



2.1 Introduction

Le sud algérien a connu un développement important en matière de mobilisation des ressources en eau. Ce chapitre fournit une présentation de cette richesse dans la zone de M'ziraa, pour mobiliser des eaux, et les utiliser à des fins d'irrigation d'un périmètre agricole à l'aval du barrage de Mestaoua.

2.2 Hydrogéologie de la zone d'étude

2.2.1 Les eaux souterraines

Ce sont des réserves d'eau qui se trouvent sous la surface de la terre, dans le sous sol notamment dans les aquifères, qui sont des formations géologiques contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau, et constituées un ensemble de roches perméables qui peut contenir une nappe d'eau et dont les caractéristiques sont homogènes. Dans notre zone d'étude, les aquifères à différentes profondeurs sont constituées de :

- Nappes superficielles à moins de 40 m alimentées généralement par les eaux des Oueds et captées à une dizaine de mètres ;
- Nappes à moyennes profondeurs de 100 à 900 m se situent dans les zones centrales ;
- Nappes profondes de l'albo-barrémien, au Sud et captées à plus de 2000 mètres.

L'alimentation des nappes exploitées, notamment le CT, provient essentiellement des piémonts de l'atlas Saharien à l'exception de certains aquifères, comme le continental Intercalaire (nappe Albo-barrémien), qui est très faiblement renouvelable (nappe fossile).

Du point de vue potentialités en eau souterraines, la région de Biskra se distingue comparativement aux autres régions limitrophes (Djelfa, Laghouat, Batna, Khenchela) qui font partie du bassin de Chott Melghir par des réserves en eau mobilisables très importantes. Le nombre de forages recensés et les volumes d'eau prélevés par les trois types d'usage (domestique, agricole et industriel) indiquent que la grande partie de la quantité d'eau soutirée des nappes est utilisée par le secteur de l'agriculture, soit environ 90%de la totalité de la ressource mobilisée.

2.2.2 Les eaux superficielles

Les ressources en eau de surface sont omniprésentes dans cette région, et sont alimentées essentiellement par les principaux oueds : Djeddi, Biskra, El Arab, et lors des crues, tous ces oueds se jettent dans le Chott Melghir. Certains micro-bassins à l'Est du Chef-lieu de la wilaya, pourront servir de retenues collinaires, sachant que le coût des aménagements est réduit et les apports pourront couvrir certaines demandes spécifiques locales.

La principale ressource en eau pour notre zone d'étude est assurée à partir des eaux superficielles emmagasinées dans le barrage de Mestaoua. Ce barrage est situé sur l'oued Mestaoua (dit Kherbouche). Le barrage s'étend entièrement sur le territoire de la commune de M'ziraa, dont il représente 26.14% de la superficie communale totale avec une capacité totale de $9.0 \times 10^6 m^3$, et une capacité utile (opérationnelle) de $6.57 \times 10^6 m^3$. Le site de ce barrage a été l'objet d'une étude durant la période coloniale, comme étant site favorable à la réalisation d'une retenue collinnaire, dans le but de mobiliser les eaux de surface et leur utilisation à des fins d'irrigation, d'écrêter les crues qui menacent les terres agricoles, d'alimenter les nappes alluvionnaires et de sauvegarder les habitants situés en aval.

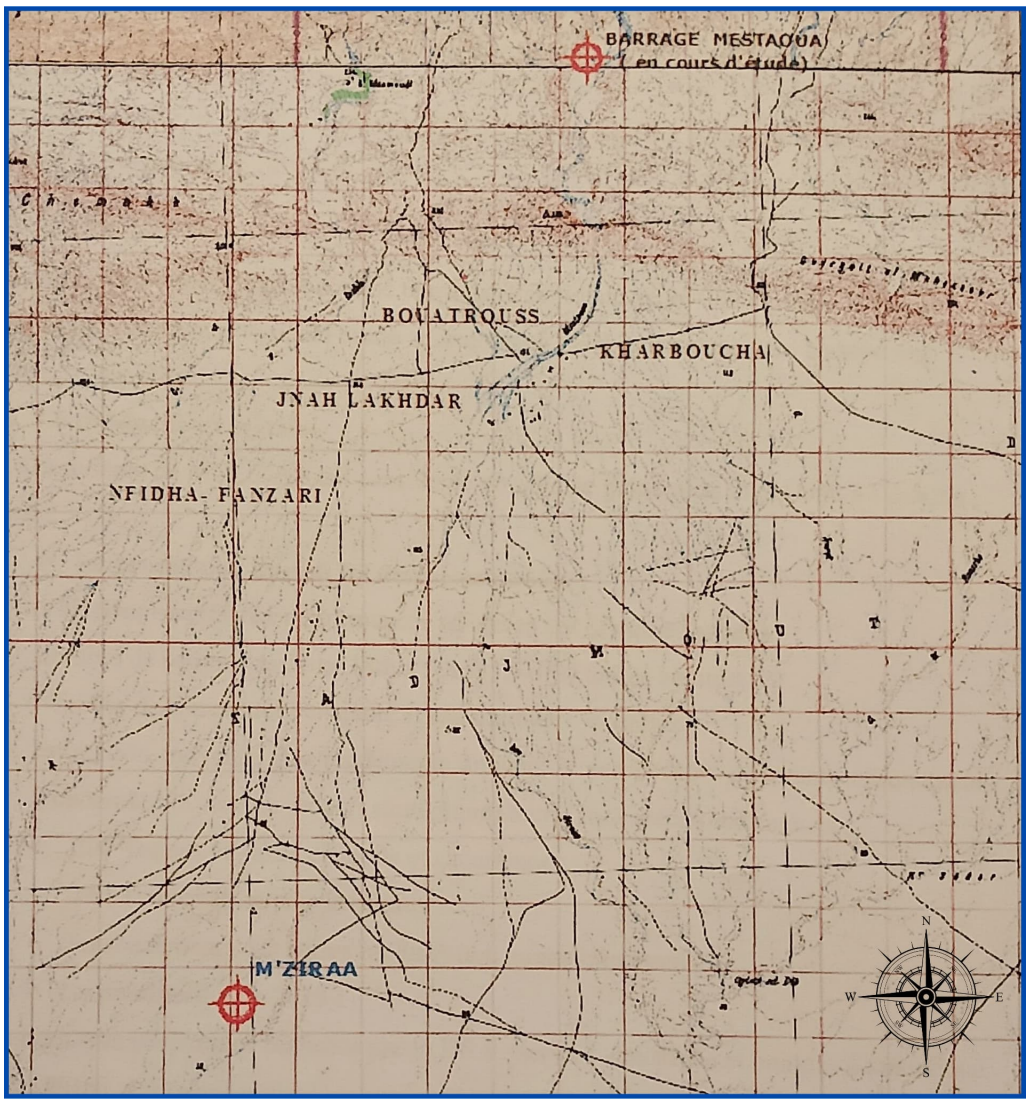


FIGURE 2.1 – Localisation de la commune de M'ZIRAA, barrage de MESTAOUA et les périmètres d'irrigation existants

□ **Source : DRE Biskra.**

Le problème qui entrave l'activité agricole dans cette région réside dans le déficit hydrique, qui peut atteindre des niveaux très élevés (environ 60%), en raison de la baisse du niveau des nappes phréatiques due à leur surexploitation (plus de 700 puits actifs). Ce déficit doit être compensé par l'approvisionnement en eau du barrage de Mestaoua.

2.2.3 Caractéristiques physico-chimique des eaux du barrage

L'analyse de l'eau d'irrigation du périmètre a été réalisée au niveau de l' ADF de Batna (Voir l'annexe section .1) :

TABLE 2.1 – Résultats d'analyse physico-chimiques de l'eau du barrage de Mestaoua destinée à l'irrigation du périmètre

CE (mmhos/cm)	pH	Ca^{++} (mg/l)	Mg^{+}(mg/l)	Na^{+}(mg/l)	SAR méq/l
0.58	7.3	206.75	127.71	104.83	1.41

□ **Source : Algérienne Des Eau Batna.**

2.3 Classifications de l'eau d'irrigation

La classification des eaux suivant la qualité chimique a été établi selon le diagramme de classification des eaux d'irrigation, en fonction de deux paramètres, celui de la conductivité électrique 'CE', et le rapport d'absorption du Sodium 'SAR'.

2.3.1 La conductivité électrique

La conductivité électrique est basée sur le principe que la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité) augmente avec l'augmentation de la concentration de la solution en ions [5]. Selon la clasification américaine des eaux d'irrigation, on distingue quatre classes de danger de salinité de l'eau en fonction de la conductivité électrique :

TABLE 2.2 – Classification des eaux en fonction de la conductivité électrique.Source : United States Salinity Laboratory (U.S.S.L.), 1954

CE en mS/cm	**Classe**
CE $<$ 0,25	**Classe C1** : Eau de faible salinité, appropriée pour la plupart des sols et des cultures sans risque significatif de salinisation.
0,25 $\leq$ CE $\leq$ 0,75	**Classe C2** : Eaux de salinité modérée, peut être utilisée sur des sols bien drainés, recommandée pour des cultures modérément tolérantes au sel.
0,75 $\leq$ CE $\leq$ 2,25	**Classe C3** : Eaux dont la salinité est élevée, peut causer des problèmes de salinisation dans certains sols, nécessite une gestion appropriée de l'irrigation et du drainage, recommandée pour des cultures tolérantes au sel.
CE $>$ 2,25	**Classe C4** : Eaux de salinité très élevée, généralement inadaptée pour l'irrigation sauf pour des sols très bien drainés et des cultures très tolérantes au sel, nécessite une gestion intensive pour éviter la salinisation.

L'eau du barrage projeté (le prélèvement a été pris dans un lac sur le lit d'Oued Mestaona) prévue pour l'irrigation du périmètre a une conductivité électrique à 25 °C égale à CE = 0.58 mmhos/cm.

2.3.2 Le SAR (Sodium Adsorption Ratio ou Rapport d'Adsorption de Sodium

Parmi le sel dissous dans l'eau, le Sodium (Na) requiert plus d'attention de haute concentration en Sodium peuvent être dommageables pour les cultures en modifiant les conditions physiques du sol. Pour apprécier le risque alcalin, on compare la concentration en ions Na+ et celle en ions Ca^{++}et Mg^{++}, où :

$$SAR = \frac{[Na^{+}]}{\sqrt{\frac{[Ca^{+2}]+[Mg]^{+2}}{2}}} \tag{2.1}$$

- $[Na^{+}]$ = 104.43 mg/l = 4.56 meq/l ;
- $[Ca^{+2}]$ = 206.75 mg/l = 10.33 meq/l ;
- $[Mg^{+2}]$ = 127.71 mg/l = 10.64 meq/l.

Alors : SAR = 1.41 meq/l.

TABLE 2.3 – Classification des eaux en fonction du SAR.

Classe	Danger d'alcalinisation
S1	Risque faible
S2	Risque moyen
S3	Risque élevé
S4	Risque très élevé

L'eau du barrage projeté (le prélèvement a été pris dans un lac sur le lit d'Oued Mestaona) prévue pour l'irrigation du périmètre a une conductivité électrique à 25 °C égale à CE = 0.58 mmhos/cm.

2.3.3 Interprétation des résultats

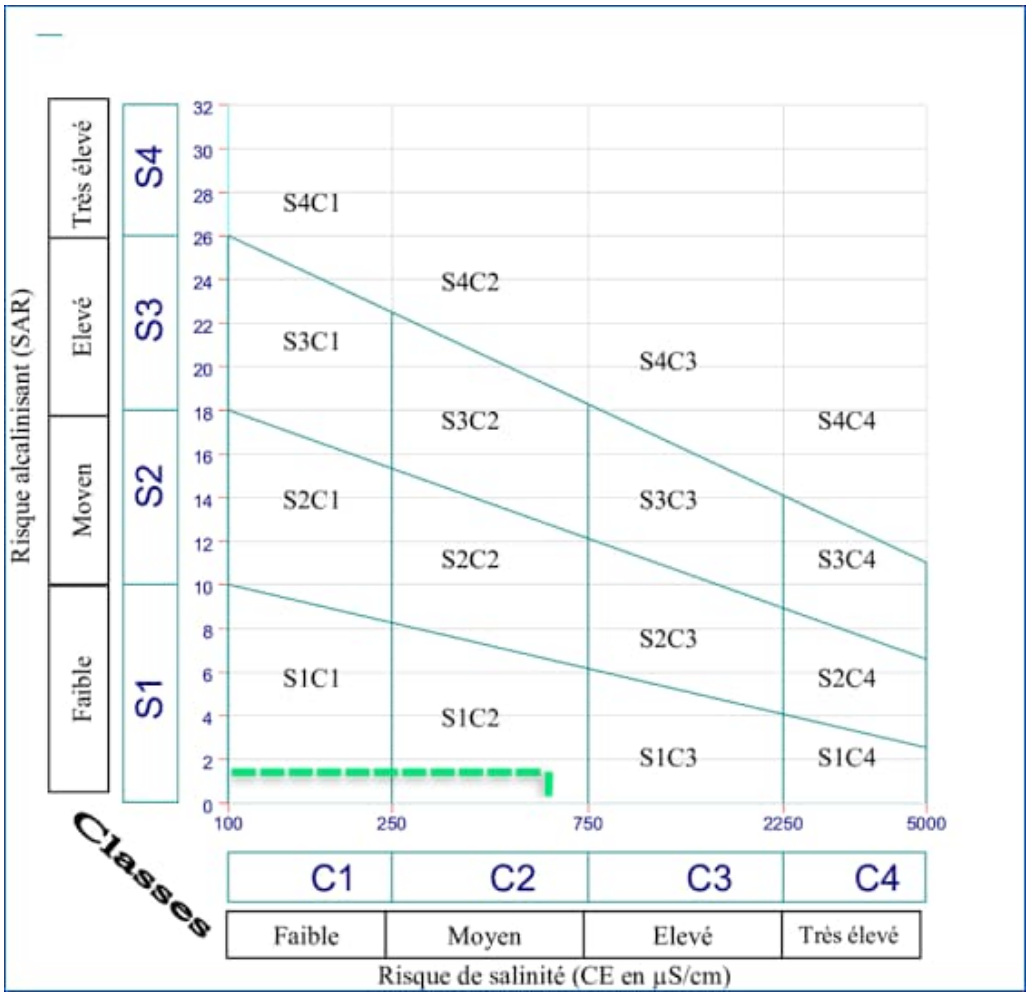


FIGURE 2.2 – Diagramme de classification des eaux d'irrigation (selon USSL, 1954)

• Cette eau fait partie de la classe C2 (Tableau2.2), ceci signifie que la salinité est moyenne, Ces eaux non salines de bonne qualité pour l'irrigation.

• Si on se réfère au diagramme de classification des eaux d'irrigation (American USSL1), les eaux d'irrigation du périmetre pousedent on SAR inférieure à 10, donc la quantité du sodium est de classe de risque faible (Tableau2.3). Cette eau ne posera pas de problème de dispersion des argiles, et par consequent, les caractères physiques particulierement l'aération et la circulation des eaux ne seront pas affectées.

2.4 Les analyses chimiques du sol

Les analyses chimiques ont réalisées sur des échantillons de sol tamisés à 2 mm [16], où :

• Le pH est mesuré par la méthode éléctrométrique ;

• La conductivité électrique et le bilan ionique ont été réalisés, avec l'ajout des quelques gouttes de toluol dans les extraits, pour assurer leur conservation et faire les analyses du bilan ionique dans de bonnes conditions ;

• Le dosage des cations solubles monovalents (potassium et sodium) a été réalisé par spectrophotométrie d'émission atomique à flamme, en présence du césium/aluminium pour réduire des

interférences entre le potassium et le sodium ;

- Le dosage des cations bivalents (calcium et magnésium) a été réalisé par spectrophotométrie d'absorption atomique, en présence du lanthane pour réduire les interférences entre le calcium et le magnésium ;
- Les chlorures sont dosés par la méthode Argentométrique de Mohr ;
- Les sulfates ont été dosés par colorimétrie ;
- Les carbonates et les bicarbonates sont dosés par titrimétrie ;
- Le calcaire total est dosé par la méthode volumétrique à l'aide du Calcimétre de Bernard.

2.5 Les caractéristiques du sol

Il ressort que cette zone est caractérisée par sept groupes homogénes de sol, et ce différencié en surface par la charge caillouteuse, la présence de végétations, la pente et la couleur des sols, et chaque groupe est représenté par un profil au minimum. Les profils 3 et 6 sont décrits en détails ci dessous, et le profil10 est decrit en annexe.

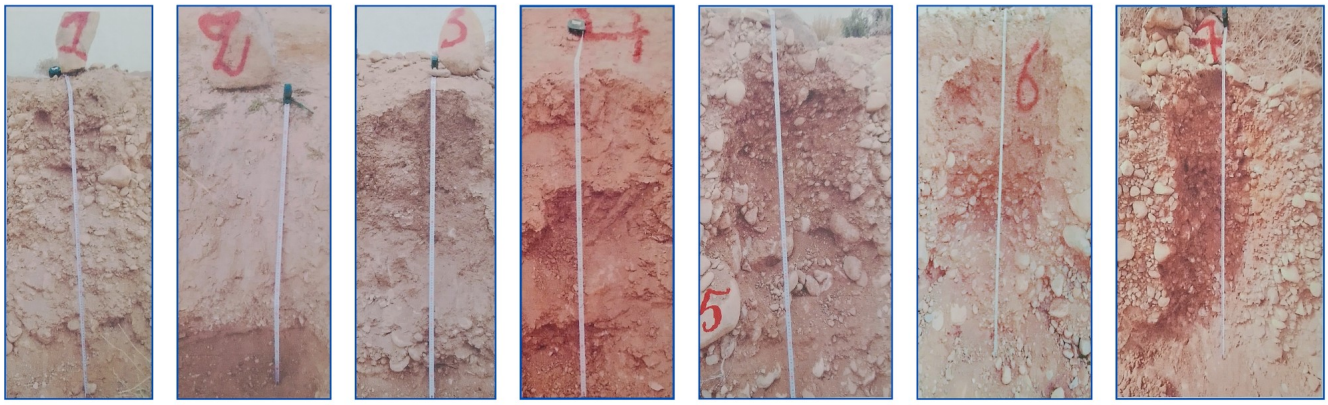


FIGURE 2.3 – Les profils de sol numérotés à 1 jusqu'à 7

□ **Source : DRE Biskra.**

a. Profil /3/

- Horizon 0-50 cm

Couleur à l'état sec : 75 YR 4/6 (brun foncé). **Couleur à l'état humide** : 7.5 YR 4/4 (brun). Texture :limono-sableuse.

Particulaire :la structure est très peu développée, c'est un sol friable et meuble, très vive effervescence à HCl, calcaire diffus, peu caillouteux 5%, pas de racines, poreux, transition diffuse.

- Horizon 50-110 cm

Couleur à l'état sec : 7.5 YR 4/6 (bran foncé). **Couleur à l'état humide** : 7.5 YR 4/6 (brun foncé).

Texture : limono-sableuse.**Particulaire** : la structure est très peu développée, c'est un sol friable et meuble, très vive effervescence à HCl, calcaire diffus, peu charge en cailloux 10%, pas de racines, poreux, transition diffuse.

- 110 cm et plus

Couleur à l'état sec : 7.5 YR 4/6 (brun foncé). **Couleur à l'état humide** : 75 TR 4/4 (brun).

Texture : limono-sableuse.**Particulaire** : la structure est très peu développée, c'est un sol friable et meuble, très vive effervescence a HCl, calcaire diffus, peu charge en cailloux 5%, pas de racines, poreux.

b. Profil /6/

• Horizon 0-50 cm

Couleur à l'état Sec :75 YR 5/6 (brun foncé). **Couleur à l'état humide** : 7.5 YR 4/4 (brun).

Texture : limono- sableuse.

Particulaire : la structure est très peu développée, c'est un sol friable et meuble, très vive effervescence à HCl, calcaire diffus, chargé en cailloux, bloc et gravier (40%), pas de racines, poreux, transition diffuse.

• Horizon 50-100 cm

Couleur à l'état sec :7.5 YR 5/6 (brun foncé). **Couleur à l'état humide** : 7.5 YR 4/6 (brun foncé).

Texture : limono sableuse.

Particulaire : la structure est très peu développée, c'est un sol friable et meuble, très vive effervescence à HCl, calcaire diffus, chargé en cailloux, bloc et gravier (40%), pas de racine, poreux, transition diffuse.

• Horizon 100 cm et plus

Couleur à l'état sec : 7.5 VR 5/8 (bran foncé). **Couleur a l'état humide** : 7.5 YR 4/6 (brun foncé).

Texture : limono- sableuse.

Particulaire : la structure est très peu développée, c'est un sol friable et meuble, très vive effervescence à HCl, calcaire diffus, charge en cailloux, bloc et gravier (40%), pas de racines, poreux, transition diffuse.

2.6 Résultats des analyses physico-chimiques du sol

• Les sols du périmètre sont non salins dans l'ensemble où la conductivité électrique très faible qui varie au moyenne entre 0.051 et 1.4 ds/m, excepté la zone représenté par les profils 3,6 et 10 (la zone salée), où la salinité est élevée, elle atteint 1.4 ds/m ; elle ne présente pas de danger immédiat, et ce peut être facilement drainé, ce qui nous mène à une nécessité de prendre en considération les qualités chimiques des eaux d'irrigation afin de projeter toute mesure de protection ;

• La teneur en calcaire total varie de 55 à 90%, le calcaire actif moyen varie de 9.5 à 12.5%à travers les profils, ce qui suppose que ces teneurs sont contraignantes au développement des cultures (risque de chlorose), le pH du sol est neutre à légèrement alcalin, favorable et sans risque pour les cultures ;

• La capacité d'échange cationique virée de 3.4 à 19.76 méq/100 g de sol, et la matière organique très faible (MO 1.25%) à travers l'ensemble des profils ;

• Les propriétés hydriques liées principalement à la composition granulométrique du sol se présentent comme très faible pouvoir de rétention en eau, et une bonne perméabilité à travers le profil.

• Les contraintes majeurs sont limitées à la présence en quantité importante de blocs : Un taux trés élevés de calcaire à travers le profil, et la pauvreté en matière organique ;

• La profondeur de sol appréciable, dépassant fréquemment les 1.20 m, avec présence par endroit d'un niveau limitant composé de calcaire, donnant ainsi au sol la propriété d'être apte à une large gamme de cultures, notamment aux cultures céréalières et maraichères de même que pour l'arboriculture (olivier, vigne, abricotier etc.)

• Une composition granulométrique sableuse permettant ainsi au sol des propriétés hydriques favorables (bonne perméabilité, bon drainage interne, et une bonne aération).

2.7 Les travaux d'amélioration et de mise en valeur

Ces sols apte à la mise en valeur mais l'accumulation des sables en forme de petites buttes ne permet pas d'effectuer la mise en culture en irrigué dans l'immédiat sans certains aménagements préalables, tels que le nivellement et la protection antiérosive.

Les actions de mise en valeur proposés avant la mise en culture des sols consistent en la réalisation de travaux d'amélioration foncière qui consiste dépierrage, cette action a pour objectif faire préparer le sol aux futures cultures. Les travaux d'amélioration et de mise en valeur préconisés sur les sols de cette unité sont dépendants des opérations suivantes :

• Le depserrage avec des travaux de sous solage et labour profond ;

• Des amendements en engrais organiques (fumier d'étable et engrais vert), afin d'améliorer la structure de sol et de faciliter la formation d'un complexe organo-minéral, qui pourrait augmenter la capacité de rétention en eau de ces sols ;

• Correction du déficit de la fertilité chimique par des amendements en engrais minéraux (fumure de redressement), et apporter aux cultures les besoins nécessaires à leur développement pendant le cycle végétatif (fumure d'entretien) et aussi prévoir la fertilisation en oligo-éléments ;

• Prévoir à court terme, la réalisation d'un réseau de drainage en prévision de l'accroissement de la salinité des sols.

2.8 Élaboration des cartes des zones homogènes

Tenant compte des objectifs de l'étude, la réalisation des zones homogénes est considérée comme base qui va compléter le choix des aptitudes culturales et les orientations agricoles spécifiques dans le périmètre. Ce travail est essentiel afin d'effectuer au préalable un zonage typologique permettant de faire disposer les terrains du périmètre d'un cadrage pratique de développement, tout en ayant pour contexte global, les orientations générales prononcées dans les autres missions. Les critères retenus pour l'identification des zones homogènes, sont dans l'ensemble des critèrespédologiques : la profondeur du sol, la texture des sols, la salinité, et les caractéristiques morpho-édaphiques. Après les analyses des sols, il ressort que :

• Les sols ont la même texture sableuse dans l'ensemble du périmètre avec des variantes : sableux, limono sableux et sablo-limoneux.

• Les sols sont pauvres en matière organique (0.2227% à 1.7734%) ;

• La teneur en calcaire est élevé ($> 50\%$), ils sont classés dans la catégorie des sols très fortement calcaire.

Tandis que, l'homogénéité de la répartition du calcaire est fonction de la topographie plus l'altitude est éleve plus le taux de calcaire diminue ; la valeur la plus élevée (90% en surface et 85% en profondeur) est enregistrée au niveau topographique 95 m et la valeur la plus faibie (55% en surface 76%en profondeur) à l'altitude de 113 m est plus.



FIGURE 2.4 – La carte des zones homogènes selon les taux de calcaire

□ **Source : DRE Biskra.**

On distingue 03 zones homogènes selon les taux de calcaire :

- La 1ère zone entre l'altitude 115 m-120 m ;
- La 2 ème zone entre l'altitude 104 m-114 m ;
- La 3ème zone entre l'altitude 92 m-104 m.

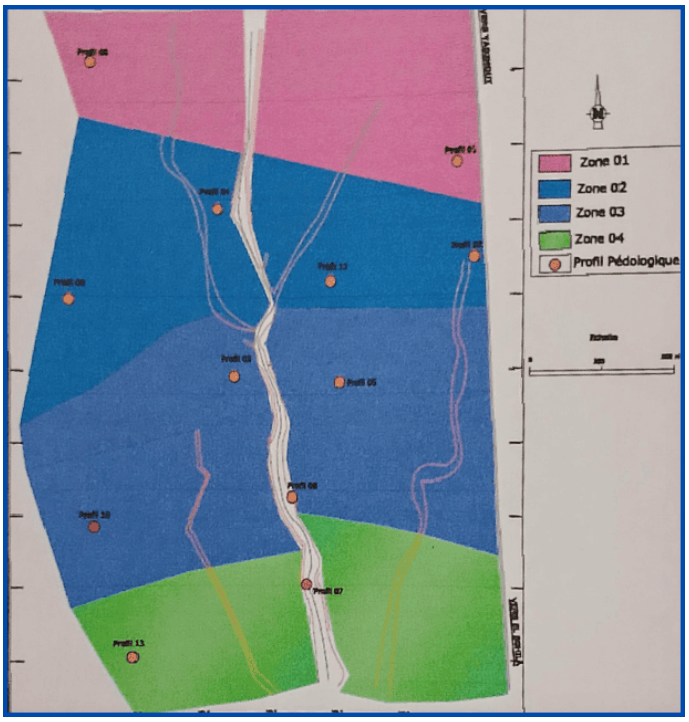


FIGURE 2.5 – La carte des zones homogènes selon la pierrosité

□ **Source : DRE Biskra.**

On distingue 4 zones homogènes selon la pierrosité :

• La zone 1 : on constate que le plus haut niveau ($> 114m$) contient une pierrosité importante inférieur à 30%en surface ;

• La zone 2 : le deuxième niveau situé à une altitude comprise entre 110 et 114m, on constate que la pierrosité est tres faible$<$ 5%, correspondant à la même pierrosité que les horizons de profondeur de la zone une ;

• La zone 3 : la pierrosité est très importante dans l'ensemble des profils étudies, de l'ordre de 40 à 50% et plus, est constitué principalement de gros blocs ;

• La zone 4 : est constituée de trou couches d'éléments grossiers, la couche centrale est constituée principalement d'élément graveleux emprisonné entre deux couches présentant des taux élevés d'éléments grossies du type blocs. La valeur moyenne des éléments grossiers sont supérieure à 50%.

2.9 Conclusion

En définitive, dans le cadre des investigations sur les ressources en eau superficielles et souterraines, les petits cours d'eau comme les grands ont fait l'objet d'un intérêt particulier, en vue de les inventorier et les proposer pour une étude détaillée.

Cette étude montre que la superposition des caractéristiques thématiques correspondantes permettent l'individualisation de ces unités homogènes, du point de vue de leurs caractéristiques et leurs potentialités.

Les contraintes décelées par cette analyse doivent être levées par des mesures de correction et d'amélioration, parmi ces caractéristiques défavorables :

◇ Le sol est très pauvre en matière organique et en éléments fertilisants nécessaires à la croissance des cultures, le niveau de fertilité très faible et exprimé par la valeur déficiente de la capacité d'échange cationique ;

◇ Une capacité de rétention en eau très faible imposant la pratique de l'irrigation avec des doses et des fréquences très élevées, notamment en période de grandes chaleurs.

Chapitre 3

Assainissement agricole



3.1 Introduction

Lorsque des crues surviennent à la suite de pluies intenses, des inondations provoquent parfois des dégâts importants [12]. Pour éliminer ces excès d'eau dans le sol, on distingue dans ce chapitre deux techniques dans l'assainissement agricole, basées sur l'étude hydrologique de deux bassins versants bordant notre périmètre projeté au voisinage des zones vulnérables.

3.2 Définitions

L'assainissement englobe diverses techniques qui assurent l'élimination des eaux excédentaires du sol, ce qui permet de le cultiver et d'obtenir une réduction suffisante et de qualité [10]. Le drainage est une opération de même nature mais à l'échelle des parcelles ou des ilots de propriétés ou d'exploitation [4].

3.3 Causes de l'excès d'humidité du sol

Il ya trois causes essentielles, qui sont [10] : **1.** Apports externes et/ou parasites d'eau :
- Apports de l'extérieur de la zone ;
- Apports en provenance d'un cours d'eau ;
- Apports internes parasites (mouillères).

2. Présence prolongée d'une nappe peu profonde.
3. Stagnation temporaire des eaux de précipitation dû à :
- Défaut d'infiltrabilité ;
- Défaut de drainage interne.

3.4 Phases de l'assainissement agricole

L'assainissement comporte trois phases, qui sont les suivantes [10] :

- Captage ou collecte des eaux excédentaires (drainage à la parcelle) ;
- Acheminement par une réseau de collecteurs ou de fossés ;
- Restitution au réseau hydro-graphique naturel (exutoire).

3.5 Étude morphologique

Pour protégé notre site contre l'inondation, on doit prendre en considération la morphologie de la zone, qui est caractérisée par une pente moyennement faible, avec un réseau hydrographique dense qui converge vers un cours d'eau qui passe en milieu du périmètre d'irrigation, donc le site doit être protégé.

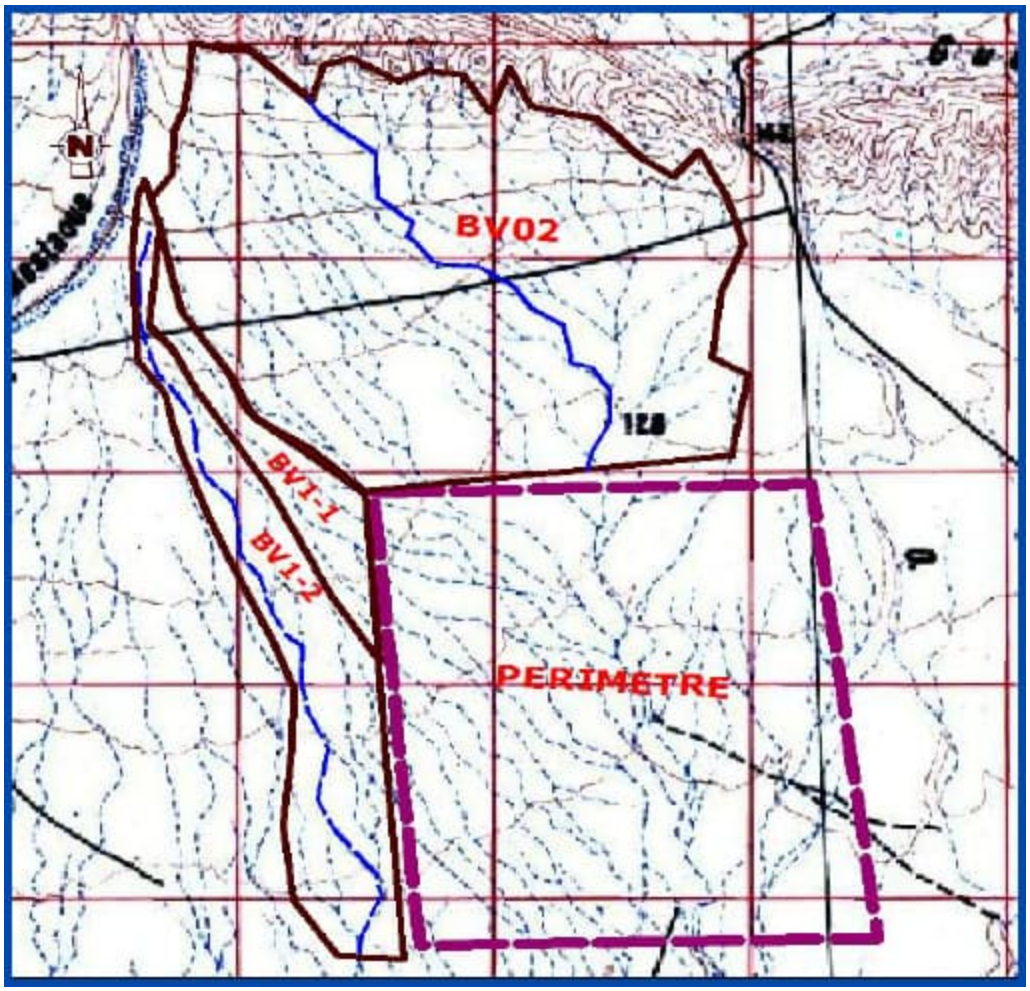


FIGURE 3.1 – Carte des bassins versants adjacents au périmètre d'irrigation

□ **Source : DRE Biskra.** Un bassin versant est une surface de terrain dont les eaux de ruissellement se concentrent en un seul point, dans sa partie la plus basse. La délimitation des bassins versants s'effectue à l'aide des courbes de niveau et des photographies aérienn [11]. Pour assurer une bonne protection du périmètre projeté, on subdivise le grand bassin versant en deux sous bassin : BV1 devise en deux sous bassin versants (BV1-1 et BV1-2), et BV2(3.1).

Les réflexions intermédiaires et de la détermination du principe régisseur de l'étude sont choisies des solutions effectivement projetées, et des zones prioritaires pour la mise en œuvre des actions, pour notre cas, ces solution peuvent être envisagées : endiguement et dérivation au voisinage des zones

vulnérables. Les ouvrages peuvent être une digne ou un canal de ceinture [5]. Ces deux ouvrages de ceinture sont destinés à protéger le périmètre contre les eaux extérieures qui ruissellent sur les versants, cela atténuer l'intensité des crues hivernales à l'aval du périmètre.

3.6 Etude géomorphologique

Au moment de la recherche des causes de les inondations, l'absence de l'assainissement agricole apparaît fréquemment comme un responsable potentiel ; il introduit d'une manière très visible dans les cours d'eau qui auraient pu circuler de manière plus diffuse. Il introduit une possibilité de partager ces eaux de pluie, entre un transfert par ruissellement de surface, une infiltration dans le sol, et une éventuelle infiltration vers les nappes souterraines plus profondes [12].

3.6.1 Caractéristiques morphologiques

Ces caractéristiques désignent les formes visibles du relief terrestre, elles dépendent des facteurs endogènes(internes), et des factures exogènes (externes).

a. Superficie et Périmètre

Ces mesures sont réalisées à partir d'une carte topographique ou, plus couramment aujourd'hui, avec des logiciels de Système d'Information Géographique (SIG).

b. La longueur du thalweg principal

Le talweg principal est le chemin hydrologique le plus long qui s'étend de l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux (ligne de crête) la plus éloignée de cet exutoire, en suivant le cours d'eau principal. Il existe deux méthodes principales pour mesurer sa longueur :

3.6.2 Caractéristiques géométriques

a. Indice de compacité de Horton 'K_h'

$$K_h = \frac{A}{L^2} \tag{3.1}$$

- A : aire totale du bassin de drainage (km^2) ;
- L : longueur du cours d'eau principal (km).

Lorsque :
$K_h < 1 \implies$ bassin de forme allongée ;
$K_h > 1 \implies$ bassin de forme ramassée.

b. Indice de compacité de Gravélius 'K_c'

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.28\frac{P}{\sqrt{A}} \tag{3.2}$$

- A : superficie du bassin (Km^2) ;
- P : périmètre du bassin (Km).

Lorsque :
$K_c = 1 \implies$ bassin compacte ;
$1 < K_c < 1.3 \implies$ bassin moins compacte ;
$K_c > 1.3 \implies$ bassin allongé.

c. Rectangle équivalent

C'est une idéalisation géométrique utilisée pour simplifier l'analyse des écoulements et des caractéristiques morphologiques du bassin. L'utilité de ce rectangle fictif en hydrologie est :

- Modélisation simplifiée des écoulements ;
- Calculs analytiques plus faciles ;
- Comparaison entre bassins de formes différentes.

La longueur el la lrgeur du rectangle équivalent sont déterminées comme suit :

$$L = \frac{K_c\sqrt{A}}{1,12}\left\{1 + \sqrt{1 - \left\{\frac{1,12}{K_c}\right\}^2}\right\} \quad \text{Et} \quad l = \frac{K_c\sqrt{A}}{1,12}\left\{1 - \sqrt{1 - \left\{\frac{1,12}{K_c}\right\}^2}\right\} \tag{3.3}$$

$$P = 2(L + l) \quad \text{et} \quad S = L \cdot l \tag{3.4}$$

- L et l : longueur et largeur du rectangle équivalent (km) ;
- P : périmètre du rectangle équivalent ;
- S : surface du rectangle équivalent.

d. Coefficient d'allongement 'C_a'

$$C_a = \frac{L_{cp}^2}{S} \tag{3.5}$$

- L_{cp} : longueur du talweg principal (Km) ;
- S : surface du bassin versant (Km^2).

3.7 Etude du relief

3.7.1 L'altitude maximale et minimale H_{max} et H_{min}

Pour extraire les altitudes maximales et minimales d'un terrain Dans ArcGIS, il faut travailler avec un Modèle Numérique de Terrain ou une couche raster représentant l'altitude.

3.7.2 La pente du bassin versant

$$I_{BV} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{talwegs}} \tag{3.6}$$

- $L_{talwegs}$: longueur de talwegs (km) ;
- H_{max} et H_{min} : hauteur maximale et minimale (m).

3.7.3 Indice de pente moyenne

$$I_{pm} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_r} \tag{3.7}$$

3.8 Etude du réseau hydrographique

3.8.1 Densité de drainage 'D_d'

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{A} \tag{3.8}$$

- $\sum_{i=1}^{n} l_i$: longueur totale de tous les thalwegs du bassin en Km ;
  - n : l'ordre le plus élevé dans la classification ;
  - A : superficie du bassin en Km^2.

3.8.2 Temps de concentration 'T_c'

: Le temps de concentration est la période de cheminement d'une goutte d'eau entre le point le plus éloigné hydrauliquement et l'exutoire [11]. Les formules utilisées reflètent un caractère régional, traduit par des paramètres à la région dans laquelle sont développées ces formules. Il faut en général choisir la formule qui correspond le mieux au type de bassin-versant analysé [7]. Dans cette étude, on utilise la formule de KIRPICH :

$$T_c = 0.0663 \frac{L_{cp}^{0.77}}{I_g^{0.385}} \tag{3.9}$$

- I_g : indice de pente globale (%) ;
  - L_{cp} : longueur du cours d'eau principal (m).

3.8.3 Vitesse de ruissellement

$$V_r = \frac{L_{cp}}{T_c} \tag{3.10}$$

- L_{cp} : Longueur du thalweg principal (Km) ;

◇ Toutes les données pluviométriques qui servent comme la base à les différents calculs sont prises de la station météorologiques de Biskra sur une période de 21 années. Les paramètres des deux bassins versants sont résumés dans le tableau suivant :

Désignation	Symbole	Unités	Valeur BV1	Valeur BV2
Superficie	S	Km^2	1.25	3.46
Périmètre	P	Km	7.84	8.04
Indice de capacité de Gravelius	K_c	–	1.96	1.21
Longueur du thalweg principal	L_p	Km	3.59	2.32
Coefficient d'allongement	Ca	–	10.31	1.56
Indice de compacticité de Horton	K_h	–	0.1	0.64
Longueur R éq	L_r	Km	3.57	2.80
Largeur du R éq	l_r	Km	0.35	1.24
Surface du R éq	S_r	Km^2	1.249	3.472
Périmètre du R éq	P_r	Km	7.84	8.08
Altitudes maximale	H_{max}	m	163	191
Altitude minimale	H_{min}	m	104	127
Pente moyenne du bassin versant	I_m	m/Km	16.43	27.59
Temps de concentration	T_c	Heures	0.86	0.50
Vitesse de ruissellement	V_r	Km/h	4.17	4.64
Précipitation moyenne annuelle	P_{moy}	mm	173.05	173.05
Pluie maximale journalière	P_{maxj}	mm	27.68	27.68
Lame d'eau ruisselée	Le	mm	15.17	14.80
Apport liquide moyen annuel		Hm^3	0.019	0.051
Module spécifique de l'apport moyen annuel	M_0	$L/s/Km^2$	0.482	0.467
Cœfficient de variation	C_V	–	0.85	0.83

3.9 Calcul et dimensionnement des ouvrages

Première variante : digue en terre

Les éléments d'une retenue sont les suivants [14] :

- Digue ;
- Lac ou cuvette réalisé à l'amont de la digue ;
- Evacuateur de surface (frontal, latéral) pour évacuer en périodes de crues les eaux excédentaires ;
- Evacuateur de fond (vidange de fond et chasse de la vase) ;
- Prises d'eau pour la consommation.

3.9.1 Choix du site de la retenue

Le ralentissement des écoulements et la diversification des vitesses de transfert à chaque étape du cheminement de l'eau sont deux actions possibles qui peuvent se concrétiser par le maintien ou la restauration de certaines fonctions naturelles des réseaux hydrographiques (zones humides jouant un rôle de champ d'expansion des crues, réseaux sinueux ou de section réduite, végétation riche et fournie...), ou obtenues artificiellement (petits ouvrages de laminage, de stockage temporaire).

En effet, les zones humides de fond de vallées sont par nature situées en aval des versants (dans les bassins d'ordre 1 à 3), souvent à la confluence de différents émissaires et encadrant le réseau

hydrographique : de par cette position elles constituent ainsi naturellement une zone potentielle de stockage des eaux de débordement lors des crues, on peut donc imaginer utiliser ces infrastructures naturelles, au prix d'aménagements légers, comme éléments régulateurs du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Lorsque les zones humides n'existent plus en raison d'une forte intensification de l'agriculture, et ne peuvent être restaurées, une action de limitation des crues par des ouvrages artificiels de rétention d'eau peut alors être envisagée.

3.9.2 Topographie de la retenue

TABLE 3.1 – Synthèse des Mesures Topographiques (ou Bathymétriques)

Altitude	Hauteur	Surface (m^2)	S moy (m^2)	V moy (m^3)	Volume cumulé (m^3)	**Surface cumulée** (m^2)
126	0	0	0	0	0	0
130	4	221652.750	110826.400	443305.602	443305.602	1663738.55
140	10	1442085.875	831869.2755	8318692.755	8761998.357	1663738.55
150	10	823454.265	1132770.008	11327700.08	20089698.43	2487192.82
160	10	478929.019	651191.6421	6511916.421	26601614.85	2966121.84
170	10	201078.896	340003.9747	3400039.747	30001654.73	3167200.77
180	10	159015.896	1800474.413	1800474.135	31802128.73	3326216.66
190	10	136002.997	1475094.473	1475094.473	33277223.21	3462219.66

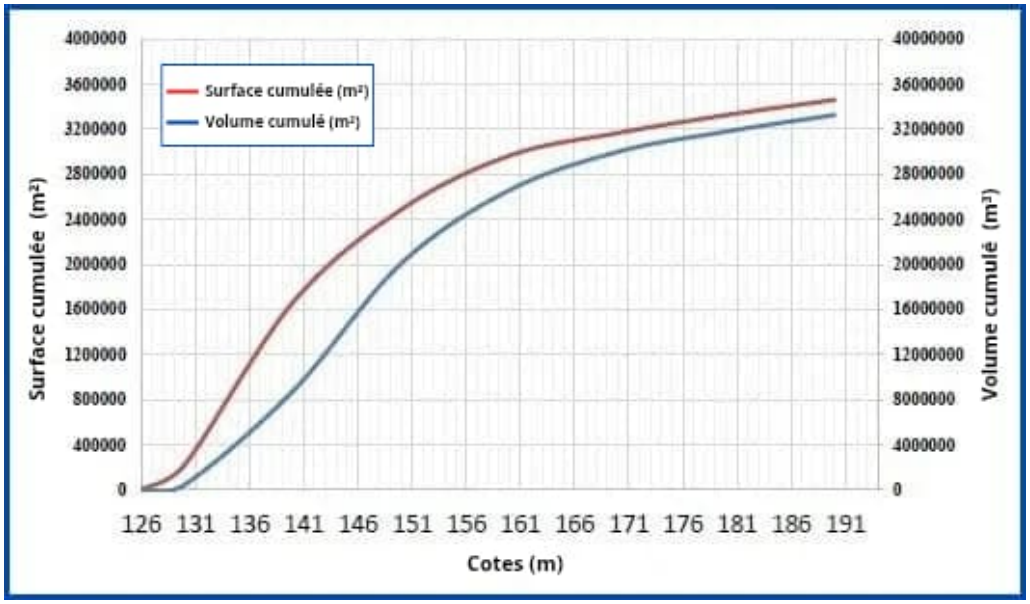


FIGURE 3.2 – Courbes Cumulées Surface-Volume en Fonction des Cotes

3.9.3 Étude de la crue

La forme de l'hydrogramme de crue est déterminée selon la méthode de SOKOLOVSKY qui assimile l'hydrogramme à deux équations paraboliques, l'une traduisant la montée de la crue et qui s'écrit :

$$Q_t = Q_{max}(\frac{t}{t_m})^2 \tag{3.11}$$

Et l'autre traduise la décrue et qui s'écrit :

$$Q_t = Q_{max}(\frac{t_d - t}{t_d})^2 \tag{3.12}$$

- Q_{max} : débit max (m^2/s) ;
- t_d : temps de décrue en (heure) ;
- t_m : temps de montée de crue en (heure) ;
- t_c : temps de concentration (heure).

On adopte un hydrogramme des crues ayant : tm = tc = 0.5 h, et td=2 tm. Donc le temps de base est de : $t_d = 3t_c = 1.5$ h.

TABLE 3.2 – Les débuts lors de la montée de la crue pour la fréquence 1%

Temps(h)	t_c	t/t_m	$(t/t_m)^2$	Q_t (1%)
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,10	0,50	0,200	0,040	1,023
0,20	0,50	0,400	0,160	4,093
0,30	0,50	0,600	0,360	9,209
0,40	0,50	0,800	0,640	16,371
0,50	0,50	1,000	1,000	25,580

TABLE 3.3 – Les débuts lors de la décrue de la crue pour la fréquence 1%

Temps (h)	t_d	t_d-t	$(t_d - t/t_d)^2$	Q_t (1%)
0	1,5	1,500	1,000	25,580
0,50	1,50	1,000	0,444	11,369
0,60	1,50	0,900	0,360	9,209
0,70	1,50	0,800	0,284	7,276
0,80	1,50	0,700	0,218	5,571
0,90	1,50	0,600	0,160	4,093
1,00	1,50	0,500	0,111	2,842
1,10	1,50	0,400	0,071	1,819
1,20	1,50	0,300	0,040	1,023
1,30	1,50	0,200	0,018	0,455
1,40	1,50	0,100	0,004	0,114
1,50	1,50	0,000	0,000	0,000

Pour constituer l'hydrogramme de crue, on utilise la valeur de debit max de fréquence 1%, correspondant respectivement à de la période de retour de 100 ans, pour assurer une bonne protection contre l'inondation et minimiser le risque de débordement.

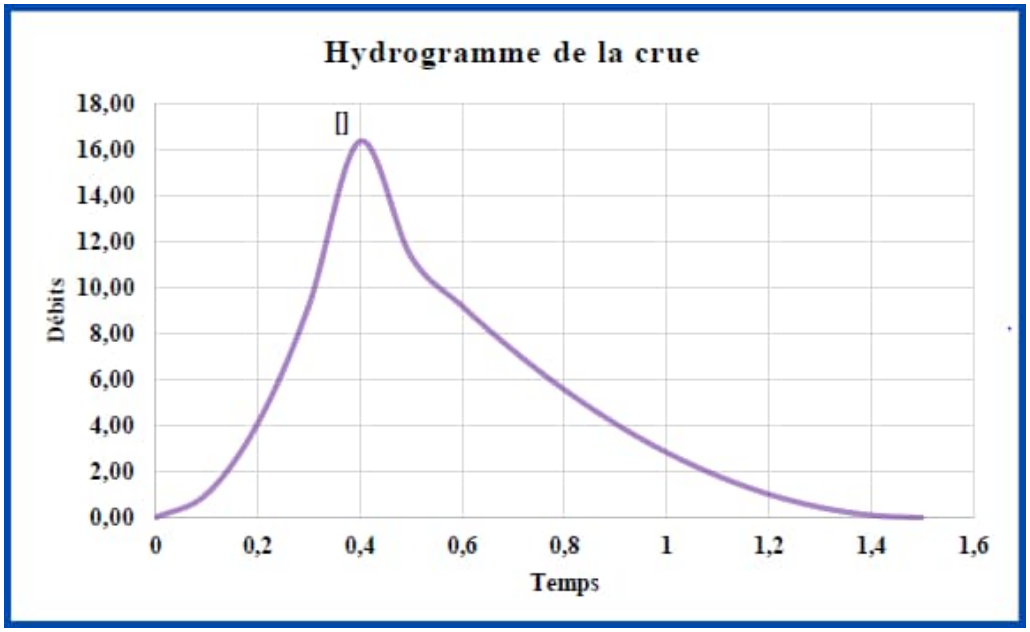


FIGURE 3.3 – Hydrogramme de la crue

3.9.4 Capacité de la retenue colinéaire

La détermination de la capacité de la retenue passe par le calcul des différents volumes qui la caractérisent [14].

a. le volume mort (les apports solides)

Le transport solide représente l'entrainement des granulats sous l'action d'un écoulement fluide, il existe dans différents phénomènes physiques, naturels ou industriels, et constitue un écoulement à la surface libre ou en charge, où ce processus relève essentiellement du ruissèlement et met en jeu diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature. Le transport solide dans les cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion, on caractérise le bassin versant par le transport solide spécifique exprimé en T/Km²/an, en prend une densité moyenne de 1.6 T/m².

Formule de TIXERONT : elle a été établie à partir des correlations de mesures faites dans différents oueds en Algérie et en Tunisie, et précisément pour l'Est Algérien, où :

$$Ta = 92R^{0.21} \tag{3.13}$$

- Ta : apport solide spécifique moyen $(T/Km^2/an)$.
  - R : lame d'eau écoulés (mm), sa valeur est égale à 14.80 mm.

  Alors : $Ta = 92 \times 14.80^{0.21} = 162.01 \quad T/km^2/an.$

  Regression erosion– apport pluviométrie

$$qs = 2.30 M_0^{0.468} Pa^{0.732} \tag{3.14}$$

- M_0 : module spécifique $(l/s/Km^2)$, sa valeur est égale à 0,467 $l/s/km^2$.
  - Pa : ploviométrie annuelle en (mm), sa valeur est égale à 178.05 mm.

  Alors : $qs = 2.30 \times 0.467^{0.468} \times 178.05^{0.732} \implies qs = 71.51 \quad m^3/km^2/an$

Régression érosions - module spécifique

$$qs = 178 M_0^{0.748}. \tag{3.15}$$

Alors : $qs = 178 \times 0.467^{0.748} \implies qs = 100.70 \quad m^3/Km^2/an.$

D'après les calculs des différentes formules, on a choisi la valeur la plus proche à la moyenne. Donc, la valeur de régression est égale à $100.7 \quad m^3/Km^2/an.$

D'autre part, on a :

$$Vm = qs \times S \times t \tag{3.16}$$

- qs : transport solide (érosion spécifique),sa valeur est égale à $100.7 \quad m^3/Km^2/an.$
- S : surface du bassin versant, sa valeur est égale à 3.46 km^2.
- t : le temps d'utilisation de la retenue s'étale sur 15 ans.

Donc :$Vm = 100.7Ö3.46Ö15 \implies Vm = 5226.33 \quad m^3/Km^2/an.$

b. Le volume utile

La modélisation numérique est la méthode la plus précise et la plus courante pour identifier le volume utile de retenue destiné à la gestion des crues et à la protection des zones vulnérables en bordure. Elle repose sur la simulation des processus hydrologiques et hydrauliques. Voici les étapes de cette méthode :

1. À partir du levé topographique de la cuvette, on établit la relation entre la hauteur d'eau 'H', la surface du plan d'eau 'S', et le volume (ou capacité 'C') de la retenue qu'elle correspond au volume maximal possible pour la retenue, défini par le niveau du déversoir.

2. Établir des composantes du bilan hydrique : c'est régi par l'équation de continuité (ou équation de conservation de la masse) sur une période de temps 'Δt'

$$\frac{dV}{dt} = Q_{entrant}(t) - Q_{sortant}(t) \tag{3.17}$$

• **Les apports :** les volumes d'eau entrant dans la retenue (débits de l'Oued, ruissellement, et des précipitations directes sur le plan d'eau)(Tableau3.4). Ils sont souvent estimés par des modèles hydrologiques.

TABLE 3.4 – La somme des apports qui entrent dans la retenue

Mois	**Apports (%)**	**Apports (m^3)**
Septembre	17.88	7151.7
Octobre	8.59	3437.2
Novembre	11.85	4738.5
Décembre	9.96	3982.7
Janvier	19.69	7876.0
Février	8.50	3400.0
Mars	21.75	8700.0
Avril	15.67	6268.0
Mai	10.27	4108.0
Juin	3.38	1352.0
Juillet	8.17	3268.0
Août	2.08	832.0

• **Total des sorties :** somme des pertes par évaporation, infiltration et des besoins (Tableau3.5), où :

• Évaporation à partir de la surface moyenne du plan d'eau et de l'épaisseur d'évaporation mensuelle.

• Infiltration estimée par un pourcentage du volume de la retenue (soit 1% volume de cette retenue).

• Volume d'eau à prélever pour les usages, estimé par un pourcentage du volume actuel.

TABLE 3.5 – La somme des pertes par évaporation, infiltration, et des besoins sortants de la retenue

Mois	**S du Plan D'eau(m²)**	**E (%)**	**E(m³)**	**I(m³)**	**Besoins (m)**	**Pertes (m³)**
Septembre	2613,16	9,62	317	52	0	369
Octobre	6004,53	6,96	527	120	0	647
Novembre	7399,79	4,60	429	148	0	577
Décembre	9480,70	3,49	417	190	0	607
Janvier	11168,60	3,52	495	223	0	719
Février	14747,35	4,60	855	295	0	1150
Mars	15872,43	6,81	1362	317	0	1679
Avril	19382,74	9,60	2346	388	0	2733
Mai	21150,02	11,54	3076	423	0	3499
Juin	21454,27	13,26	3586	429	0	4015
Juillet	20122,84	13,38	3393	402	0	3796
Août	19858,91	12,63	3162	397	0	3559

3. Le calcul du volume de stockage est mené de façon séquentielle (mois par mois), en partant d'une hypothèse de volume initial qui était approximativement égale au volume final du mois précédent.

◇ Les résultats obtenus de la modélisation nemirique de la retenue pour identifier le volume utile sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 3.6 – Bilan hydraulique mensuel de la retenue

Mois	**Capacité** (m^3)	**Apports** (m^3)	**Pertes**(m^3)	**Stockage** (m^3)
Septembre	5226,33	7151.7	369	12009
Octobre	12009,07	3437.2	647	14800
Novembre	14799,57	4738.5	577	18961
Décembre	18961,39	3982.7	607	22337
Janvier	22337,21	7876.0	719	29494
Février	29494,71	3400.0	1150	31745
Mars	31744,85	8700.0	1679	38765
Avril	38765,48	6268.0	2733	42300
Mai	42300,04	4108.0	3499	**42909**
Juin	42908,54	1352.0	4015	40246
Juillet	40245,67	3268.0	3796	39718
Août	39717,82	832.0	3559	36991

Alors, le volume utile est de 42909 m^3, ce qui correspond au volume maximal stocké au moment où le débit de pointe des crues est écrêté et ramené au débit de fuite admissible requis pour protéger l'aval.

c. La revanche

C'est une tranche comprise entre la cote des plus hautes eaux et la crête du barrage, elle constituera une protection contre le ballotage des vages, et servira comme un tranche pour Vimortissement des crues.

Il existe des formules exspirimentales permettent d'évaluer la hauteur des vagues, en fonction de la longueur du plan d'eau ou FETCH, et de la vitesse do vent.

Formule de MALLET et PAQUANT

$$R = Hv + \frac{V^2}{2g} \tag{3.18}$$

$$Hv = \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\sqrt{L}$$

$$V = \frac{3}{2} + \frac{2}{3}Hv$$

- Hv : hauteur des vagues (m) ;
- L : longueur du plan d'eau (Fetch), sa valeur est égale à 0,30 km ;
- V : vitesse de propagation des vagues (m/s).

Alors :

$Hv = \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\sqrt{0.3} \implies Hv = 0.68 \quad m$

$V = \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \times 0.68 \implies V = 1.95 \quad m/s$

$R = 0.68 + \frac{1.95^2}{2\times 9.81} \implies R = 0.87 \quad m$

Formule de STEVENSEN

$$R = 0.75Hv + \frac{V^2}{2g} \tag{3.19}$$

Et pour calculer la vitesse des vagues, on utilise la formule de GAILLARD, où :

$$V = 1.5 + 2Hv$$

On a 2 cas pour déterminer l'hauteur des vagues Hv :

$L \geq 18Km \implies Hv = 0.34\sqrt{L}$

$L \leq 18Km \implies Hv = 0.75 + 0.34\sqrt{L} - 0.26\sqrt[4]{L}$

Etant donnée que la longueur le FETCH est égale à 0.3 m, alors :

$Hv = 0.75 + 0.34\sqrt{0.3} - 0.26\sqrt[4]{0.3} \implies Hv = 0.74 \quad m$

$V = 1.5 + 2 \times 0.74 \implies V = 2.98 \quad m/s$

$R = 0.75 \times 0.74 + \frac{2.98^2}{2\times 9.81} \implies R = 1 \quad m$

◇ Résultats de calculs des formules de Mallet et Pagaunt, de Stevensen sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 3.7 – Valeurs comparées de Hv, V et R selon la formule utilisée

Les formules	**Hv (m)**	**V (m/s)**	**R (m)**
F.Mallet et Pagaunt	0.68	1.95	0.87
F. STEVENSEN	0.75	2.98	1

On adopte la valeur de la revanche égale à 0.87 m pour des raisons de sécurité.

3.9.5 Calculs de la digue en terre

a. La hauteur de la digue

Elle est égale à la somme des hauteurs du niveau maximal de la retenue et la charge d'eau sur le déversoir et la revanche, càd $Hb = Hn + R$

- Hb : Hauteur du barrage en (m) ;
- Hn : Hauteur de la digue correspondant au niveau normal de la retenue en (m), sa valeur est égale à 0.4 m ;
- R : Revanche, sa valeur est égale à 0.87 m.

Alors : $Hb = 0.4 + 0.87 \implies Hb = 1.27 \quad m$. Cette valeur correspondant à une cote de 127.27 m.

b. La largeur en crête de la digue

La largeur dépend essentiellement des dimensions exigées par la route d'exploitation sur la retenue, on la détermine selon les formules survantes :

Formule de T. Knappen

$$b = 1.65\sqrt{Hb} \tag{3.20}$$

- b : Largeur en crète de la digue (m) ;
- Hb : La hauteur du barrage en (m).

Alors : b = 1.85 m

Formule de PREECE

$$b = 1 + 1.1\sqrt{Hb} \tag{3.21}$$

Alors : b = 2.23 m.

Formule simplifié

$$b = 3.6\sqrt[3]{Hb} - 3 \tag{3.22}$$

Alors : $b = 0.89 \quad m$

On adopte une valeur de 2 m comme largeur en crète de la digue.

c. La pente des talus de la digue

TABLE 3.8 – Valeur des pentes pour digues en terre.

Hauteur (m)	Type de digue en terre	Pentes des talus (hauteur / base)	
		Amont	Aval
Inferieur a 5 m	- Homogène	1/2.5	1/2
	- A zones	1/2	1/2
5 a 10 m	- Homogène à granulométrie étendue	1/2	1/2
	- Homogène à fort pourcentage d'argile	1/2.5	1/2.5
	- A zones	1/2	1/2,5
10 a 20 m	- Homogène à granulométrie étendue	1/2.5	1/2.5
	- Homogène à fort pourcentage d'argile	1/3	1/2.5
	- A zones	1/2	1/3

Valeurs des pentes Selon la hauteur de la digue 1.27 m comme suit :

- La pente pour le talus amont est 1/2.5 ;
- La pente Pour le talus aval 1/2.

d. La largeur de la digue

$$B = Lb_1 + Lb_2 + b \tag{3.23}$$

$Lb_1 = \frac{Hb}{i_1}$ *et* $Lb_2 = \frac{Hb}{i_2}$, donc :

$Lb_1 = \frac{1.27}{\frac{1}{2.5}} \Longrightarrow Lb_1 = 3.75 \quad m$

$Lb_2 = \frac{1.27}{\frac{1}{2}} \Longrightarrow Lb_2 \simeq 3 \quad m$

$B = 3.75 + 3 + 2 \Longrightarrow B = 8.75 \quad m$

◇ Les caractéristiques de la retenue et sa digue en terre sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 3.9 – Les caractéristiques de la retenue et sa digue en terre

Désignation	**Symbole**	**unité**	**Valeur**
Volume mort	V_m	m^3	5226.33
Niveau du volume mort	NVM	m	126.05
Volume utile	V_u	m	42909
Niveau normal de la retenue	NNR	m	126.3
Revanche	R	m	1
Hauteur de la digue	Hb	m	1.27
Niveau de crête de la retenue	NCR	m	127.27
Largeur en crête de la digue	b	m	2
Fruit du talus amont	m_1	–	1/2.5
Fruit du talus aval	m_2	–	1/2
Largeur de la digue	B	m	8.75

Deuxième variante : canal de protection

3.9.6 Dérivation des eaux selon un régime spécifique

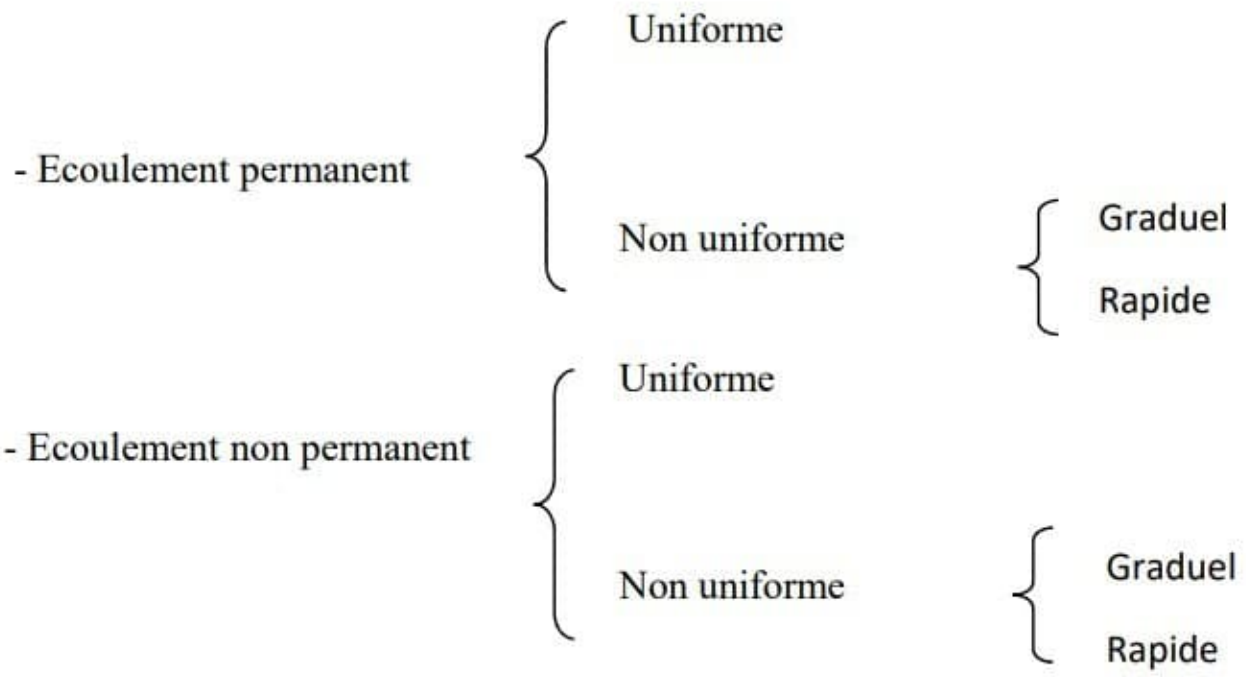
La dérivation des eaux vers le réseau hydrographique permettant de les restituer vers des zones situées en dehors du périmètre à protéger, et pour atteindre cet objectif, un canal artificiel trapézoïdale a été construit le long des limites ouest du périmètre. Ce profil a été soigneusement choisi, car il représente le profil le plus rentable hydrauliquement, pour sa grandeur capacité de transit des eaux, le champ d'écoulement est maximum, et par ce qu'il présente un profil plus stable.

Les proprietors hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières. L'application de la théorie hydraulique donne souvent des résultats satisfaisants [7].

L'ecoulement a surface libre est défini comme un écoulement de liquide avec une surface qui est en contact avec l'aire libre est la pression atmosphérique. Ce cas d'écoulement se fait sous l'action de la force de gravité à cause de l'existence de la pente [7].

a. Types d'écoulement en hydraulique fluviale

L'hydraulique fluviale est une partie de l'hydraulique, traité des écoulements dans les canaux artificiel ayant une surface libre soumise à la pression atmosphérique et dont la forme peut varier. Les types d'écoulement qu'on rencontre en hydraulique fluviale sont :



b. Regime d'ecoulement

: un écoulement peut être soumis aux différents types d'écoulement qui sont classées par le nombre de Froude en tenant compte des forces d'inertie, forces de gravité, il est défini comme le rapport entre les force de gravité et les forces d'inertie [12] où :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_h}} \tag{3.24}$$

- v : Vitesse moyenne de l'écoulement ;
- D_h : Profondeur hydraulique ;
- g : Accélération gravitationnelle.

Lorsque :

$Fr = 1 \implies$ le régime est critique (supercritique) ;

$Fr < 1 \implies$ le régime est fluvial (subcritique) ;

$Fr > 1 \implies$ le régime est torrentiel.

La notion de régime fluvial, torrentiel ou critique s'applique évidemment au cas particulier du régime uniforme.

c. Système d'équations de NAVIER- STOCKES et Équation de Bernoulli

Le système d'équations de Navier-Stokes est l'ensemble d'équations aux dérivées partielles (EDP) fondamentales qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens visqueux (liquides et gaz). Ce système mathématique est une application de la deuxième loi de Newton (conservation de la quantité de mouvement, $\sum \vec{F} = m\vec{a}$) , et du principe de la conservation de la masse à un élément infinitésimal de fluide (divergence du champ de vitesse est nulle, $\nabla \cdot \vec{v} = 0$). Ces équations établissent un bilan

des forces agissant sur le fluide où :

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} = F_x - \frac{du}{dt} + \nu\nabla u \\ \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial y} = F_y - \frac{dv}{dt} + \nu\nabla v \\ \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z} = F_z - \frac{dw}{dt} + \nu\nabla w \end{cases}$$

La forme vectorielle de ce système d'équations de Navier-Stokes est présentée comme suit :

$$\frac{1}{\rho}\overrightarrow{gradP} = \vec{F} - \vec{\gamma} + \nu\nabla\vec{V} \tag{3.25}$$

- $\frac{1}{\rho}\overrightarrow{gradP}$: forces de pression ;
  - $\vec{F}$: forces extérieures ;
  - $\vec{\gamma}$: forces d'inertie ;
  - $\nu\nabla\vec{V}$: forces de viscosité.

L'équation générale d'EULER est la loi générale de la dynamique, c'est un ensemble d'équations aux dérivées partielles (EDP) qui décrivent le mouvement d'un fluide parfait (non-visqueux et non conducteur de chaleur) et compressible, ce qui la rend plus simple que le système de NAVIER-STOCKS. Pour un régime permanent, l'équation générale d'EULER s'écrit :

$$\frac{1}{\rho}(dP) = F_x dx + F_y dy + F_z dz - VdV + \nu(\nabla u dx + \nabla v dy + \nabla w dz)$$

En appliquant cette équation sur une particule liquide incompressible soumise à la seule action de la gravité ($F_x = F_y = 0, F_z = -g$), il en découle :

$$\frac{1}{\rho}(dP) + gdz + VdV - \nu(\nabla u dx + \nabla v dy + \nabla w dz) = 0$$

Le théorème de Bernoulli est une conséquence directe obtenu par l'intégration de l'équation d'Euler, sous les conditions d'écoulement stationnaire, incompressible et le long d'une ligne de courant. Après l'intégration de l'équation d'EULER :

$$\frac{P}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} - \nu\int(\nabla u\, dx + \nabla v\, dy + \nabla w\, dz) = \text{Const}$$

$$\frac{P}{\rho g} + z + \frac{V^2}{2g} - \frac{\nu}{g}\int(\nabla u\, dx + \nabla v\, dy + \nabla w\, dz) = \text{Const} = H$$

$$\frac{P}{\rho g} + z + \frac{V^2}{2g} + J = H \tag{3.26}$$

On prend : $J = -\frac{\nu}{g}\int(\nabla u\, dx + \nabla v\, dy + \nabla w\, dz)$

- J : est la perte de charge de l'origine du mouvement jusqu'au point considéré [2] ;
- $\frac{P}{\rho g}$: hauteur manométrique (m) ;
- z : altitude (m)
- $\frac{P}{\rho g} + z$: hauteur piézométrique (m).
- $h + \frac{V^2}{2g}$: énergie totale (H_s) par unité de poids d'un fluide mesurée par rapport au fond du canal. Elle comprend l'énergie de position (hauteur d'eau), et l'énergie cinétique (vitesse de l'écoulement).

Pour notre étude, on va utiliser le logiciel "CANAL 21", dont le principe de calcul est basé

sur la méthode par approximation successive, ce logiciel est effectivement utilisé dans le domaine de l'hydrométrie en France, notamment par les services de gestion des eaux. Il permet de gérer les données hydrologiques, les stations de mesure, les jaugeages pour tracer les courbes de tarage concernant les canaux ou les rivières.

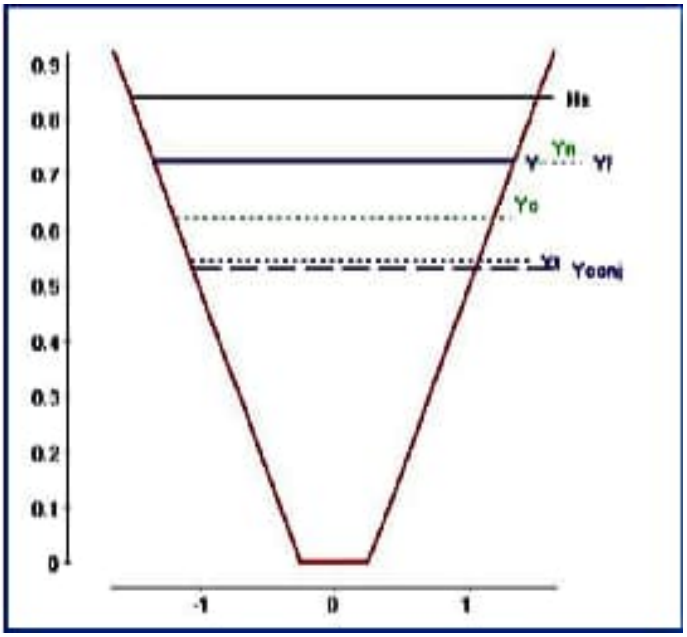


FIGURE 3.4 – Profil en travers du canal de protection

Pour la détermination des pentes de projet, on se base sur le levé topographique des deux zones d'étude, qui nous a permis de tracer les profils en long de chaque tronçon.

3.9.7 Dimensionnement du cannal

Pour simplifier les calculs en hydraulique, on peut admettre que l'écoulement dans le canal de protection est à la fois permanent et uniforme, ce qui signifie que ses caractéristiques mentionnées précédemment ne changent ni dans le temps ni dans l'espace.

Un écoulement est dit permanent ou stationnaire si les caractéristiques du fluide, comme sa vitesse, sa pression ou sa masse volumique, ne varient pas dans le temps en un point fixe de l'espace. Cela ne signifie pas que le fluide est immobile, mais que son état en un point donné reste constant.

Un écoulement est uniforme si la vitesse moyenne, la profondeur et la section mouillée du fluide restent constantes d'une section à l'autre d'un canal, avec des lignes de courant qui sont droites et parallèles, et ce régime d'écoulement nécessite dans un canal ouvert que la pente de la surface libre et celle du fond du canal soient parallèles.

a. Les formules de calcul

La formule de calcul principale pour un écoulement permanent uniforme de l'eau est la formule de Chézy . La vitesse moyenne du courant sous la forme suivante :

$$V = C\sqrt{R_h i} \tag{3.27}$$

Alors :

$$Q = CS\sqrt{R_h i} \tag{3.28}$$

- S : section mouille (m^2) ;
  - R_h : rayon hydraulique où $R_h = \frac{S_m}{P_m}$ (m) ;
  - i : pente de fond du canal (mm) ;
  - C : cœfficient de Chézy ($m^{\frac{1}{2}}/s$). Pour déterminer le Coefficient de Chezy, on utilise la formule de MANING-STRICKLER :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}} \tag{3.29}$$

Cette formule permet de transtonner la formule de Cheży pour obtenir :

$$V = Ks.R_h^{\frac{2}{3}}.i^{\frac{1}{2}} \tag{3.30}$$

- Ks : cœfficient de rugosité de STRICKLER, depend de la nature du matériau du canal :
  Ks = 25 pour un lit natuurel ;
  Ks = 40 pour le cas d'enrochement on gabionnage ;
  Ks = 75 pour le cas du Béton Armé ;
  Ks = 100 pour le cas du PVC ou PEHD.

b. Les paramètres de la section de canal 1-1

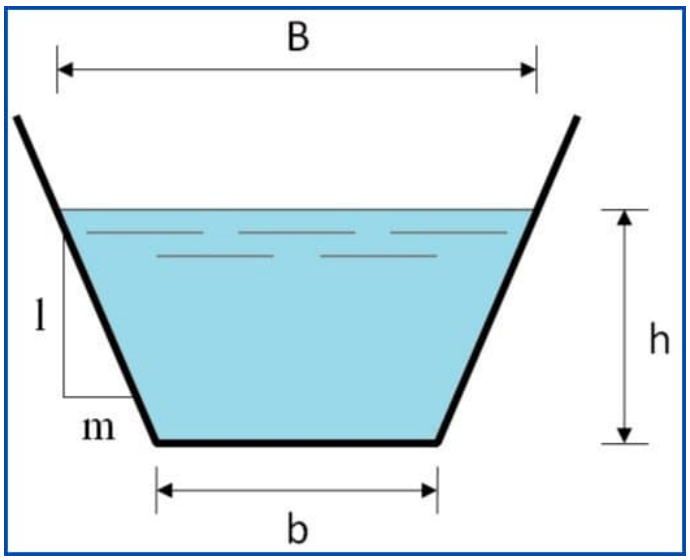


FIGURE 3.5 – Coupe transversale d'un canal trapézoïdal.

- b : largeur au fond ;
- B : Largeur au miroir ;
- m : Fruit du talus ;
- S_m : section mouillée ;
- P_m : périmètre mouillé ;
- R_h : rayon hydraulique.

c. Les paramètres liées à l'écoulement

1. **Hauteur d'eau :** la profondeur réelle de l'eau à un point donné dans le canal.
2. **Hauteur normale :** la profondeur d'eau en régime uniforme.

3. Hauteur critique : la profondeur à laquelle l'énergie spécifique est minimale, c'est associé à une énergie minimale qui peut véhiculer le débit d'écoulement (Figure **??**).

Lorsque : $h_n < h_c \implies$ écoulement uniforme torrentiel.

$h_n > h_c \implies$ écoulement uniforme fluvial.

4. Hauteur de conjugaison : permet de calculer la hauteur d'eau après le ressaut en fonction de celle avant le ressaut, et inversement.

◇ Les paramètres du canal de protection sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 3.10 – Récapitulatif des paramètres du canal de protection

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Début	Q	m^2/s	1.72
Vitesse	V	m/s	1.15
Largeur	b	m	0.5
Largeur au miroir	B	m	2.67
Périmètre mouillé	P_m	m	3.11
Section mouillée	S_m	m^2	1.14
Profondeur hydraulique	D_h	m	0.43
Rayon hydraulique	R_h	m	0.37
Fruit de talus	m	/	1.5
Coefficient de rugosite de STRICKLER	K_s	/	25
Nombre de Froude	Fr	/	0.73
Pente	i	m/m	0.013
Pente de ligne de charge	j	m	0.0136
Tirant d'eau	h	m	0.84
Hauteur normale	h_n	m	0.53
Tirant critique	h_c	m	0.62
Tirant d'eau fluvial	h_f	m	0.72
Tirant d'eau conjugué	H_{co}	m	0.72
Énergie spécifique	H_s	m	0.72
Énergie spécifique critique	H_{sc}	m	0.81

3.10 Le drainage agricole

Le terme drainage agricole comprend le système de drainage des terres cultivées, les sorties de drainage, les décharges et les canaux de drainage [6]. Le réseau de drainage est constituée des composantes suivantes [4] :

- Les drains ;
- Les collecteurs secondaire qui recueillent l'eau des drains ;
- Les collecteurs primaires qui recueillent l'eau des collecteurs secondaire ;
- L'émissaire qui reçoit l'eau du réseau et l'évacue hors du périmètre.

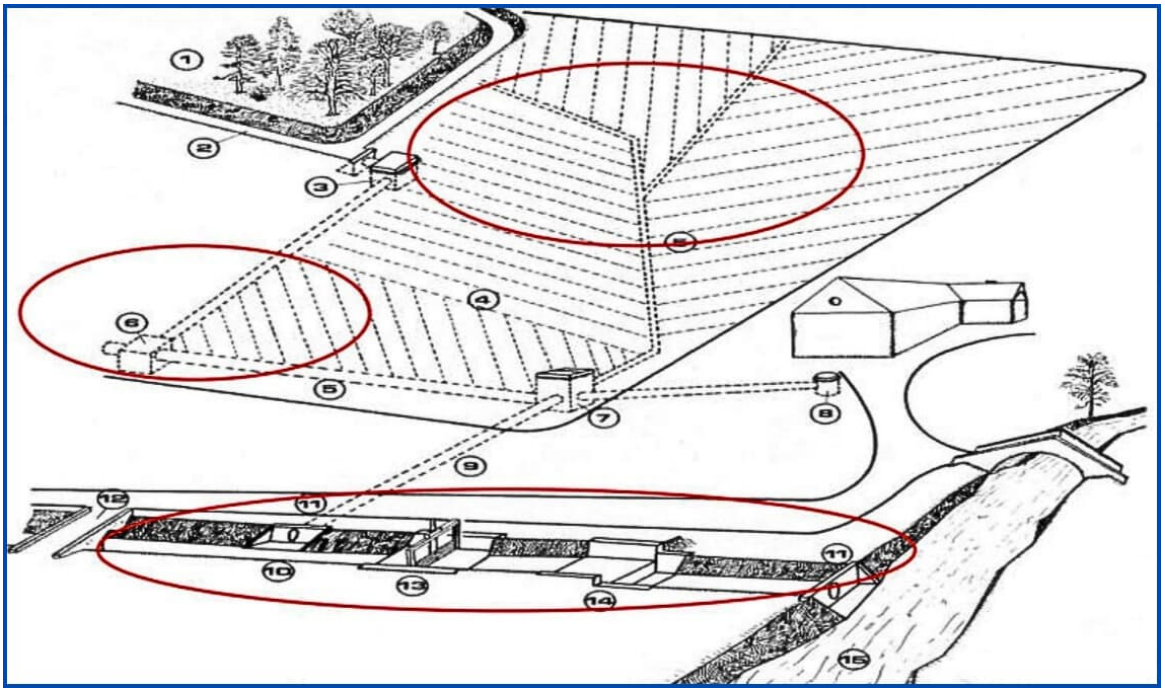


FIGURE 3.6 – Projection des différents constituants d'un réseau de drainage [4]

1- Zone boisée ou non drainée. 2- Fossé de collecte des eaux de ruissellement extérieures au périmètre de drainage. 3- Avaloir sur fossé. 4- Files de drains enterrés. 5- Collecteurs. 6- Boite de jonction. 7- Regard de visite. 8- Avaloir pour le recueil des eaux pluviales de la ferme. 9- Exutoire en canalisation enterrée. 10- Exutoire en fossé à ciel ouvert. 11- Bouche de décharge. 12- Passage busé pour accès à la parcelle. 13- Ouvrage de régulation avec vanne pour régler la hauteur de l'eau à l'amont. 14- Ouvrage de chute pour réduire la pente longitudinale du canal. 15- Cours d'eau naturel : émissaire.

Les drains peuvent être des tuyaux ou des fossés à ciel ouvert et il en est de même pour les collecteurs [4]. Ce tuyau collecteur permet de contrôler le débit de l'eau dans le réseau de drainage, jusqu'à l'exutoire [6].

3.10.1 Les systèmes de drainage

Pour un terrain présentant principalement des problèmes d'engorgement d'eau dans les zones dépressionnaires, on développera un réseau de drains qui suivra et reliera ces zones, ce réseau de drainage irrégulier qui en résulte s'appelle un réseau de drainage naturel (Figure3.7). Au fur et à mesure que la dimension ou le nombre de zones d'engorgement augmente, l'intérêt d'installer un réseau de drainage naturel disparaît au profit d'un réseau ordonné de type parallèle ou en arrête de poisson (Figure 3.8).

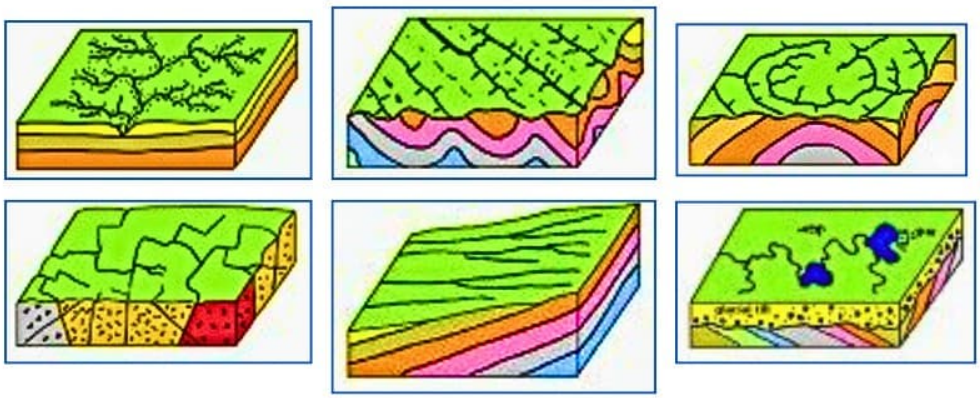


FIGURE 3.7 – Motifs de drainage naturel et ses structures géologiques

3.10.1.1 Système en arête de poisson

C'est particulièrement adapté sur des terrains ondulés où seul une partie du terrain doit être drainée. Dans ce système les collecteurs sont alignés dans le sens de la plus grande pente et les drains sont alors alignés quasi perpendiculairement à la pente, mais avec un autre angle faible par rapport aux courbes de niveau afin que l'eau s'écoule avec une faible pente vers le collecteur, et que le drain soit maintenu à une profondeur constante sous la surface du sol.

3.10.1.2 Système parallèle

Si le site est une grande plaine composée principalement de parcelles rectangulaires, le système parallèle est souvent privilégié. Le drainage y est assuré par une pente de 0,05 à 0,1%. Cela est obtenu en augmentant progressivement la profondeur du drain vers son exutoire sur une longueur maximale d'environ 250 mètres. L'augmentation de profondeur qui en résulte généralement ne dépasse pas 10 à 20 cm.

Dans ces systèmes, il est souvent préférable d'installer le collecteur dans le sens de la pente et les drains latéraux le long des courbes de niveaux. Cela permet de connecter des drains de deux côtés au collecteur et donc réduit de moitié le nombre de collecteurs nécessaires.

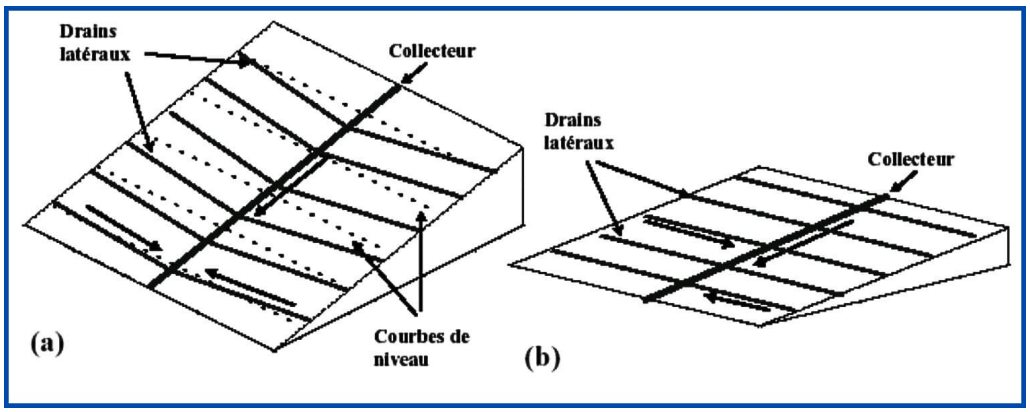


FIGURE 3.8 – Représentation schématique d'un réseau de drainage en arrête de poisson (a) et parallèle (b)

Il faut classer ces systèmes [5] :

- Drainage de surface.

- Drainage de subsurface :
- par fossés à ciel ouvert ;
- par drains enterrés ; classique et techniques associés (drainage taupe et drainage par galeries) ;
- par des techniques qui sont actuellement marginale (Puits, biodrainage).

3.10.2 Types de drain

La première utilisation des drains souterrains remonte à 200 ou 300 ans. À l'origine on n'utilisait pas de tuyaux mais on plaçait à la base d'une tranchée des cailloux ou des branches qui étaient ensuite recouverts de terre. C'est au début du siècle qu'apparaît l'utilisation de drains en tuyaux, d'abord en terre cuite puis en ciment dans les zones ne possédant pas de tuileries. Quant aux tuyaux en plastique, leur utilisation remonte aux années 1960. Grâce au système de drainage souterrain en place, les excès d'eau pénètrent dans les drains, soit par les petites perforations des tuyaux en plastique, soit par l'espace entre deux tuyaux en argile ou en béton consécutifs [6].



FIGURE 3.9 – Les différents types de drains :1-Drain en teree cuite, 2-Drain en ciment, 3-Drain à double paroi.

□ **Source :**
https ://www.leboncoin.fr/ad/bricolage/3054819329
L'enveloppe du drain est un matériau que l'on place autour du drain dans le but suivant :

- Fonction hydraulique : réduire la perte de charge à l'entrée d'eau dans le drain en facilitant l'écoulement de l'eau vers les ouvertures dans le drain ;
- Rôle de filtre : empêcher l'entrée de particules fines dans le drain principalement en réduisant la vitesse d'écoulement de l'eau vers les points d'entrée d'eau, donc en limitant la capacité de transport de cette eau.

3.10.3 Les objectifs de drainage

Lorsque le drainage naturel n'est pas suffisant pour l'évacuation des eaux excédentaires, le drainage agricole par un système artificiel est la solution la plus approprié. Ce système assure des conditions d'humidité du sol qui soient favorables au développement des cultures, et qui favorisent les pratiques de gestion du sol. On peut citer à cet effet les avantages potentiels suivants :

Assèchement : Le problème de l'engorgement du sol par l'eau peut affecter des superficies très variables, allant des taches humides de quelques centaines de mètres carrés au sein d'un champ à plusieurs centaines de kilomètres carrés dans le cas de terres marécageuses ou de polders.

Augmenter la survie et le rendement des cultures : dessèchement plus rapide du sol en début de saison de culture, permettant ensemencer plus tôt au printemps, et donc d'assurer une saison de culture plus longue, et de récolter dans de bonnes conditions.

Aérer le sol : lorsque la circulation de l'air dans les pores pleins d'eau est lente, la plante meure d'asphyxie, et les processus microbiologiques et chimique dans le sol s'arrêtent ou ralentissent.

Lutter contre la salinisation : les plantes ont besoin d'une certaine quantité de sels solubles mais les excès de ces sels dans la zone racinaire réduisent la croissance des plantes en modifiant l'absorption d'eau ; lorsque la teneur en sel de l'eau du sol est supérieure à celle de l'eau à l'intérieur des cellules végétales, les racines des plantes ne peuvent pas absorber l'eau du sol, elles peuvent même perdre de l'eau au profit du sol, alors l'excès de sels dans le sol peut également entraîner des toxicités ou des déséquilibres spécifiques aux ions (Figure3.10).

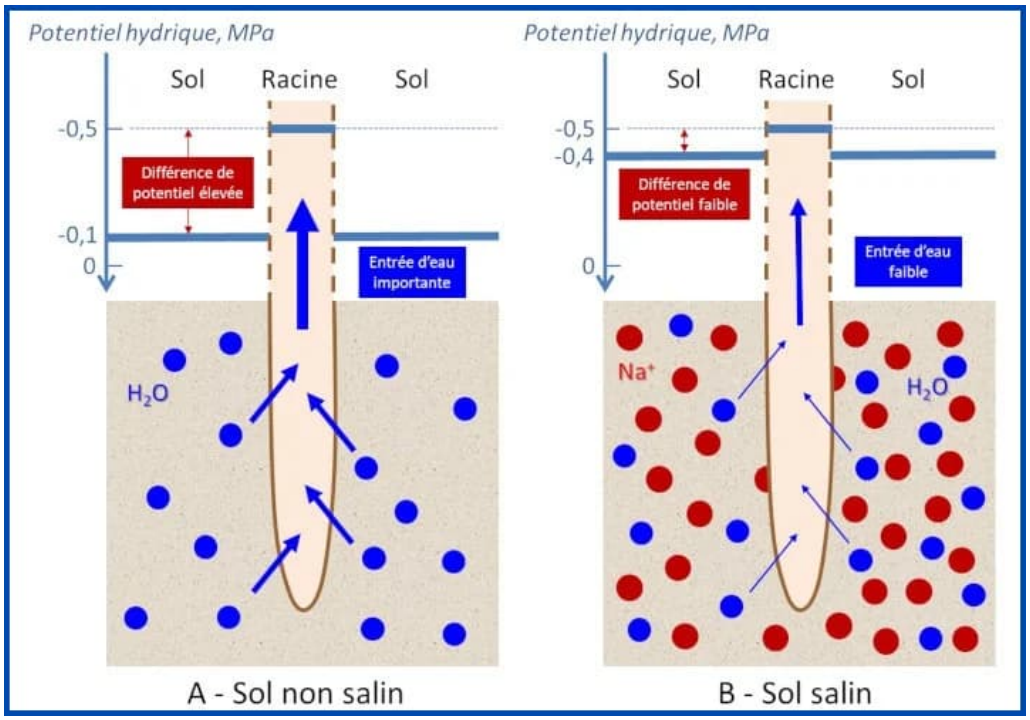


FIGURE 3.10 – Impact de la salinité du sol sur l'absorption d'eau par les plantes

☐ **Source :**

https ://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/comment-plantes-supportent-regime-sale/

Travailler le sol dans de bonnes conditions : le travail du sol pour préparer le semis ne peut pas se faire sur un sol trop humide.

3.10.4 L'impact du drainage sur l'hydrologie et l'écologie

Lors de la mise en place d'un plan de drainage, il est primordial de trouver un juste équilibre entre les avantages résultant d'une production agricole intensive et soutenue et ceux résultant du maintien d'un écosystème sein et de la sauvegarde de la biodiversité.

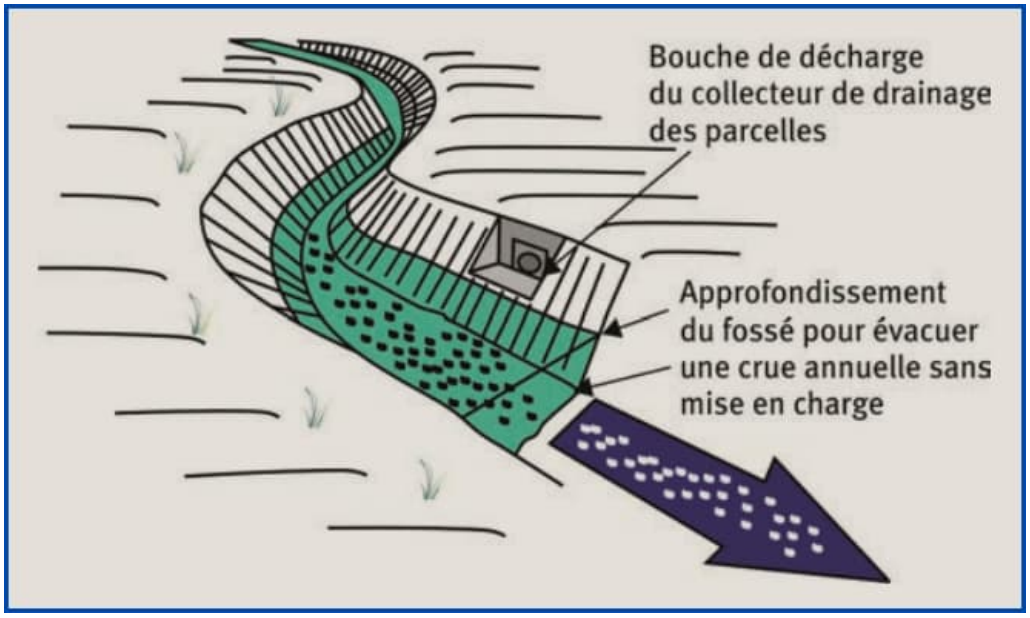


FIGURE 3.11 – Connexion réseau de drainage et fossé d'assainissement agricole [15]

3.10.4.1 Limiter l'impact du drainage sur l'hydrologie

Rappelons que le fossé d'assainissement agricole est dimensionné de telle sorte que le collecteur de drainage débouche au-dessus de la ligne d'eau d'une crue de période de retour annuelle (Figure **??**)([5]).

3.10.4.2 Limiter l'impact du drainage sur la qualité des eaux

Les solutions techniques de traitement des eaux en sortie de tuyaux sont de deux types : ingénierie hydraulique (drainage contrôlé et bioréacteur) et ingénierie écologique (zone tampon humide artificielle, zone riparienne) [15].

3.11 Conclusion

Dans le cadre du projet d'assainissement agricole de la zone d'étude située dans M'ziraa, un canal de protection avec une longueur totale de 587.41 m a été aménagé à l'ouest, en complément, une digue au nord avec une largeur de 8.85 m et une hauteur de 1.27 m, pour réguler les flux d'eau.

La lutte contre la salinisation par le drainage est essentielle pour maintenir la fertilité des sols et assurer une production agricole durable, surtout dans les régions arides et semi-arides.

Chapitre 4

Besoin en eau des cultures



4.1 Introduction

Biskra est l'un des pays leaders dans le domaine de l'agriculture, grâce à son climat favorable, riche en eaux souterraines et en sols arables, ce chapitre met en valeur cet avantage qui confère à la région l'état de leader en termes de variété et de qualité des produits agricoles.

4.2 L'occupation des sols

L'occupation des sols est une description physique de l'espace observée de la surface terrestre et du recouvrement du sol. Elle distingue plusieurs catégories biophysiques : les zones de végétation (arbres, buissons, champs, pelouses), les sols nus (même s'il s'agit d'un manque de couverture), les surfaces humides et les plans d'eau (nappes et cours d'eau, zones inondables), et les surfaces dures.

◇ Les pourcentages proposés aux différentes cultures sont détaillés dans les deux tableaux suivants :

Table 4.1 – Les cultures et ses pourcentages proposés pour la zone 1

Cultures	**Occupation (%)**	**Surface (Ha)**
Oignon	15	42
Haricot vert	15	42
Piment et poivrons	20	56
Tomates	20	56
Courgette	20	56
Olivier	10	28
Total	100	280

TABLE 4.2 – Les cultures et ses pourcentages proposés pour la zone 2

Cultures	**Occupation (%)**	**Surface (Ha)**
Orge	30	16.5
Blé tendre+ dure	35	19.25
Pomme de terre	35	19.25
Total	100	55

4.2.1 Rotation et assolements

L'assolement est la manière décidée de diviser une terre en plusieurs parties et d'affecter une culture spécifique à chacune de ces parties afin de répondre aux besoins de production de l'année et d'assurer la mise en œuvre de la rotation.

La rotation est une séquence d'alternance de cultures différentes qui se répète sur un cycle défini, pour préserver et améliorer la fertilité du sol, optimiser l'utilisation des ressources (eau, nutriments), et pour couper le cycle des bioagresseurs (maladies, ravageurs, mauvaises herbes) .

◇ L'assolement proposé est détaillé dans le tableau suivant :

TABLE 4.3 – Les Assolements

Assolement 1	**Assolement 2**
Blé	Orge
Blé	Pomme de terre (S)
Oignon	Tomate
Pomme de terre (S)	Haricot vert
Tomate	Oignon
Piment et poivrons	Courgette
Pomme de terre (AS)	Tomate
Olivier	Olivier

4.3 Calcul de la pluie efficace

La pluie efficace, P_{eff}, représente la fraction des précipitations qui est effectivement utilisée par la culture après déduction des pertes par ruissellement de surface et par percolation [5]. En effet, la pluie effective ne présente qu'une partie de la précipitation totale réellement tombée, il faut éliminer :

- Les pluies trop faibles (moins de 10 mm) qui tombent sur un sol chaud et ne pénètrent que très peu dans le sol (évaporation superficielle) ;
- La partie ruisselée des pluies violentes ;
- La partie des pluies de longue durée, dépassant la capacité de stockage du sol.

La méthode proposée par I'L.R.A.T intègre les paramètres suivants :

$$P_{eff} = P - R \tag{4.1}$$

- P : Pluie mesurée en mm ;
- R : ruissellement en mm.

Lorsque :

$P > 20mm \implies R = 0.15(P - 20)$

$P<20mm \implies R = 0 \quad alors : P_e = P$

◇ Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

TABLE 4.4 – Les pluies efficaces en mm

Moins	**Ja**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jl**	**At**	**S**	**O**	**N**	**D**
P (mm)	19,69	8,5	21,75	15,67	10,27	3,38	8,17	2,08	30,94	14,87	20,5	17,23
R (mm)	0	0	0,27	0	0	0	0	0	1,65	0	0,08	0
P_e **(mm)**	19,69	8,5	21,48	15,67	10,27	3,38	8,17	2,08	29,29	14,87	20,42	17,23

4.4 L'aspect cultural

4.4.1 Les profondeurs racinaires des cultures

Zr (m), la profondeur d'enracinement maximale, déterminée pour des cultures arrivées à maturité et cultivées sur sol profond [5].

Les espèces hydrophiles adaptées à des conditions où le sol est saturé, dont les racines, tiges ou feuilles peuvent être immergées ou flottantes, il faut donc que la réserve utile soit réapprovisionnée par ascension capillaire (cas du peuplier, de l'aulne...).

Les espèces xérophiles sont adaptées à la sécheresse, elles peuvent extraire l'eau pour des tensions de succion voisines du point de flétrissement (pin sylvestre, plantes herbacées des pelouses sèches) [5].

Les plantes mésophiles sont adaptées à un environnement tempéré, avec une humidité du sol moyenne, une températures modérée et un climat ni aride ni tropical.

Généralement, les plantes à productions fruitières ou à graines, possèdent des périodes critiques (ébauches florales, pré fructification,...) pour leur alimentation en eau et des périodes plus ou moins sensibles (nouaison, grossissement des fruits ou graines) [5].

◇ Les profondeurs racinaires des cultures choisées sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 4.5 – Les profondeurs d'enracinements des différentes cultures

Cultures	S	O	N	D	Ja	F	M	A	M	J	Jt	At
Oignons	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	-	-	-	-	-	-	-
Haricot vert	0.1	0.15	0.2	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
Pim et poiv	-	-	-	-	-	0.4	0.6	0.8	0.9	1	-	-
Tomate	-	-	-	0.2	0.5	0.7	0.9	1	1	-	-	-
Courgette	-	-	-	-	-	-	0.3	0.4	0.5	0.70	0.70	-
Olivier	1.20	1.20						1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Orge	-	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	-	-	-	-	-
Blé tendre+dure	-	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	-	-	-	-	-
P de t	-	-	-	-	-	-	0.3	0.4	0.5	0.6	-	-

4.4.2 L'Estimation des coefficients culturaux 'K_c'

Le coefficient culturel 'K_c' définit un rythme de consommation d'eau d'une culture, il traduit l'influence des caractéristiques spécifiques de la culture (type de plante, stade de développement, couverture du sol) sur sa consommation en eau. Cela évalue l'évapotranspiration maximale de la culture 'ETc' par rapport à l'évapotranspiration de référence selon la formule :

$$K_c = \frac{ETM}{ET_0} \tag{4.2}$$

L'évolution du coefficient cultural 'K_c' en fonction de l'indice foliaire (*Leaf Area Index* 'LAI') d'une culture est une relation non linéaire et croissante. Cette évolution suit typiquement une courbe qui peut être divisée en trois phases principales :

1. Phase de Croissance Initiale ($LAI \in [0 \sim 2]$, LAI est faible) : la majeure partie de l'évapotranspiration est due à l'évaporation du sol (limitée par la petite surface foliaire). L'augmentation du LAI signifie que plus de surface de sol est couverte par la végétation, plus la transpiration végétale augmente , donc le cœfficient K_c est initialement bas.

2. Phase de Couverture Maximale ($LAI \in [2 \sim 4]$, LAI est modéré à élevé) : lorsque le LAI atteint une valeur critique (souvent autour de 3 à 4 pour de nombreuses cultures), le couvert végétal assure une couverture quasi-complète du sol.

3. Phase Maximale ou de Plateau (LAI est élevé) : la transpiration est au maximum. même si le LAI continue d'augmenter légèrement ou reste élevé, le K_c se stabilise à sa valeur maximale.

◇ Les cœfficients culturales 'Kc' des cultures choisées sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 4.6 – Coefficients culturaux 'Kc' des principales cultures

Culture	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	At
Oignon	-	0.7	1.1	1.1	0.9	0.85	-	-	-	-	-	-
Haricot vert	0.4	0.7	0.95	0.9	-	-	-	-	-	-	-	-
Pim et poiv	-	-	-	-	-	0.6	0.9	0.95	0.95	0.85	-	-
Tomate	-	-	-	0.4	0.7	0.95	1.05	0.8	0.7	-	-	-
Courgette	-	-	-	-	-	-	0.7	0.95	1	1	0.8	-
Orge	-	0.3	0.7	0.7	1.05	1.05	1.05	0.65	-	-	-	-
blé	-	-	0.4	0.7	0.9	1.05	1.05	0.7	0.2	-	-	-
P de T	-	-	-	-	-	-	0.75	1.1	1.2	0.75	-	-
Olivier	0.65	0.66	-	-	-	-	-	0.7	0.7	0.58	0.5	0.5

4.5 L'aspect climatique

4.5.1 Types d'évapotranspiration en agriculture

L'évapotranspiration est un concept regroupant deux phénomènes : l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration des plantes. Elle permet de déterminer la quantité d'eau à apporter aux cultures pour compenser les pertes. Voici les principaux types d'évapotranspiration utilisés, soit en suivie hydrologie, soit en gestion de l'irrigation en matière de précision :

1. ET_0 représente l'évapotranspiration standard définie par Penman (1956) comme étant la quantité d'eau transpirée par unité de temps par une végétation courte et verdoyante, recouvrant complètement le sol, de hauteur uniforme et qui ne manque jamais d'eau [5].

2. L'évapotranspiration maximale 'ETM' représente la quantité d'eau que la plante consommerait dans des conditions idéales : sol bien irrigué, pas de stress hydrique et climat favorable (Figure4.1). Cela est utilisée pour dimensionner les besoins en irrigation d'une culture spécifique.

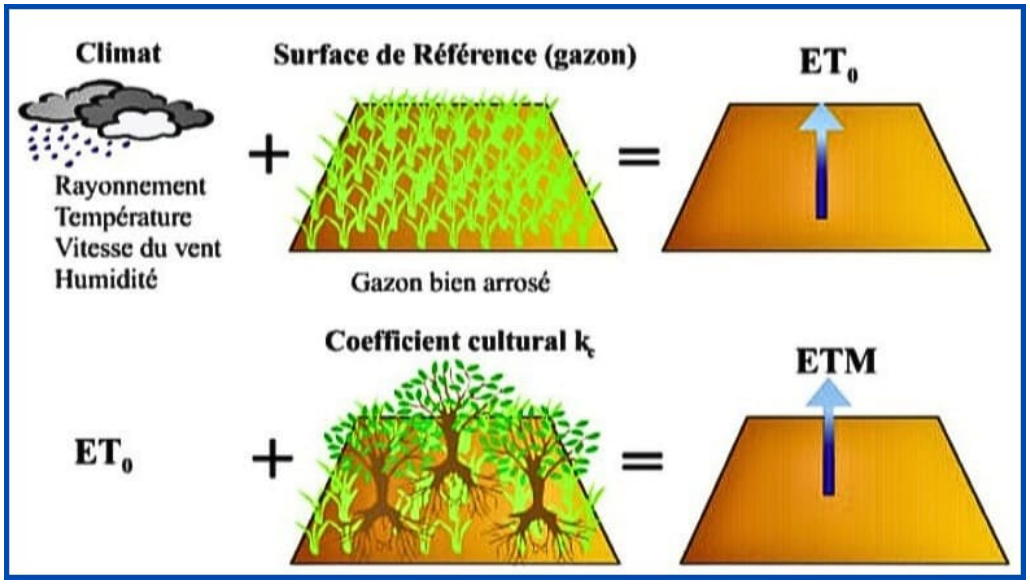


FIGURE 4.1 – Le Concept de l'Évaportranspiration de Référence ET_0 et de l'Évaportranspiration Maximale ETM en agriculture.

□ **Source :** www.nitidae.org

3. En déduire l'ETR en faisant intervenir l'état hydrique du sol [9]. Elle reflète les conditions réelles du sol et de la culture (sol sec, stress hydrique...), alors elle est limitée par la disponibilité de l'eau contrairement à l'ETP. Si l'eau disponible diminue tandis que la tension de succion du sol augmente, les racines ont de plus en plus de difficulté d'extraire l'eau, l'évapo-transpiration diminue ; elle devient inférieure à l'ETP : c'est l'ET Réelle [5].

4. Évapotranspiration culturale 'ETC' représente l'évapotranspiration spécifique à une culture donée à un stade de développement précis. Cela permet de calculer les besoins en eau exacts pour chaque culture.

4.5.2 Méthode d'évaluation de l'évapotranspiration

• Méthodes directes

• **L'évapotranspiromètre ou cuve lysimétrique :** c'est un appareil scientifique essentiel en hydrologie et en agronomie, il s'agit essentiellement d'un grand réservoir étanche contenant une colonne de sol et une couverture végétale, qui est exposée aux conditions naturelles.

En connaissant les apports d'eau (précipitations P) et les sorties par drainage 'D', on peut calculer l'évapotranspiration selon l'équation de bilan massique simplifiée :

$$ET = P - D \pm \Delta R \tag{4.3}$$

• ΔR : variation de la réserve en eau du sol (souvent mesurée avec des lysimètres de pesée très précis qui mesurent la variation de poids de la cuve).

• **Le bac évaporant :** c'est un réservoir d'eau peu profond, souvent circulaire, exposé à l'air libre pour mesurer la baisse du niveau de l'eau sur une période donnée ; cette baisse est due à l'évaporation naturelle causée par le soleil, le vent, la température et l'humidité, le plus couramment utilisé est le bac de classe A. Il s'agit d'un récipient circulaire, d'un diamètre de 121 cm et d'une profondeur de 25,5 cm, placé sur un cadre de bois à claire-voie posé à même le sol [5]. Malgré tous ces inconvénients, les bacs évaporatoires peuvent être utiles, dans la mesure où ils sont mis en corrélation avec d'autres mesures de l'évapotranspiration potentielle (ETP) [5].



FIGURE 4.2 – Station agrométéorologique avec lysimètres et bacs d'évaporation.

Un coefficient de correction est appliqué pour tenir compte du fait que l'eau libre a un pouvoir d'évaporation plus grand qu'une culture sur pied. Le coefficient de correction approprié varie entre 0,5 et 0,85 selon de nombreuses expériences. Il est proposé d'utiliser la relation empirique suivante :

$$\mathrm{ETP}_{\text{couvert total}} = 0,66\mathrm{E}_{\text{bac}} \tag{4.4}$$

On prend également en compte le stade de croissance de la plante, pour cela il est proposé d'utiliser la relation empirique suivante :

$$\mathrm{ETP}_{\text{couvert partiel}} = 0,33(1+\mathrm{C})\mathrm{E}_{\text{bac}} \tag{4.5}$$

La troisième étape consiste à estimer les besoins d'irrigation 'I' comme suit :

$$I = \mathrm{E}_{\text{bac}}(0,33 \times 0,9)(1+C) - R \tag{4.6}$$

Alors :

$$I = 0,3\mathrm{E}_{\text{bac}}(1+C) - R \tag{4.7}$$

- C : fraction de sol couverte par la plante, qui varie de 0 (la culture vient d'être semée ou plantée) à 1 (la parcelle cultivée est complètement couverte) ;
- W : besoins en eau effecptifs de la plante, soit : W = 0,8 ETP ;
- L : fraction correspondant au lessivage, soit : L = 0,1 ETP ;
- R : pluies tombées depuis la dernière irrigation.
- **L'évaporomètre piche :** c'est un instrument météorologique utilisé pour mesurer le taux d'évaporation de l'eau dans l'atmosphère. Il se compose d'un tube en verre gradué (souvent de 0 à 20 mm) d'environ 25 cm de long, rempli d'eau distillée. L'extrémité inférieure de ce tube est fermée par un disque de papier buvard (ou papier filtre), maintenu par une pince métallique, où ce papier est constamment humidifié par l'eau du tube. La relation de base pour calculer l'ETP à partir de l'évaporation du Piche s'écrit généralement sous la forme :

$$ETP = A \times E_{Piche} \tag{4.8}$$

- A : coefficient de correction, sa valeur est obtenue par calibrage.
- Méthodes indirectes

Les pertes par évaporation dépendent des conditions météorologiques, qui varient au fil du temps. Pour les déterminer, on peut observer les variables météorologiques pertinentes (température, vent,

humidité atmosphérique et ensoleillement), puis appliquer l'une des nombreuses équations fonctionnelles ou formules permettant de calculer l'évapotranspiration potentielle [5]. On utilise le logiciel CROPWAT pour calculer l'évapotranspiration de référence 'ET_0' en appliquant la méthode de Penman-Monteith :

$$ET_0 = C\,[W \cdot R_n + (1 - W) \cdot F(u) \cdot (e_a - e_d)] \tag{4.9}$$

- W : facteur de pondération rendant compte de l'effet de rayonnement à différentes températures et altitude ;
- Rn : rayonnement net en évaporation équivalente, exprimé en mm/jour ;
- F(u) : fonction liée au vent ;
- ea : tension de vapeur saturante à la température moyenne de l'air, en millibars ;
- ed : tension de vapeur réelle moyenne de l'air, exprimée en millibars ;
- ea-ed : facteur de correction, afin de compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

4.5.3 Calcul de l'évapotranspiration référence 'ET_0'

◇ Les résultats obtenus pour calculer l'évapotranspiration référence à l'aide du logiciel CROPWAT sont résumés dans le tableau suivant :

TABLE 4.7 – Données Climatiques Mensuelles

Moins	$T_{min}(°C)$	$T_{max}(°C)$	Humidité(%)	Vent(m/s)	Insolation (h)	Ray $(MJ/m^2/j)$	ET_0 **(mm/j)**
Janvier	6.9	17.1	58	4.0	7.3	11.5	2.74
Février	8.1	19.1	49	4.4	8.2	14.8	3.83
Mars	11.3	23.1	42	4.8	8.6	18.3	5.48
Avril	14.8	26.8	38	5.7	9.6	22.4	7.48
Mai	20.0	31.9	33	5.3	10.4	25.1	9.29
Juin	24.8	37.7	28	4.2	11.2	26.7	10.33
Juillet	27.8	40.9	25	3.8	11.3	26.5	10.77
Aôut	27.8	40.1	28	3.5	10.9	24.7	9.84
September	23.2	34.2	39	3.9	8.9	19.5	7.74
October	18.0	28.9	46	3.5	8.4	15.8	5.42
November	12.0	22.1	54	3.9	7.6	12.2	3.70
Décember	8.1	17.7	59	4.0	6.9	10.4	2.72
Moyenne	**16.9**	**28.3**	**42**	**4.3**	**9.1**	**19.0**	**6.61**

4.6 L'aspect pédologique

4.6.1 L'humidité du sol et le potentiel hydrique

La teneur en eau utile du sol (EU) est la différence entre le contenu en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au point de flétrissement. Plus un sol est fin : plus la valeur de l'humidité au

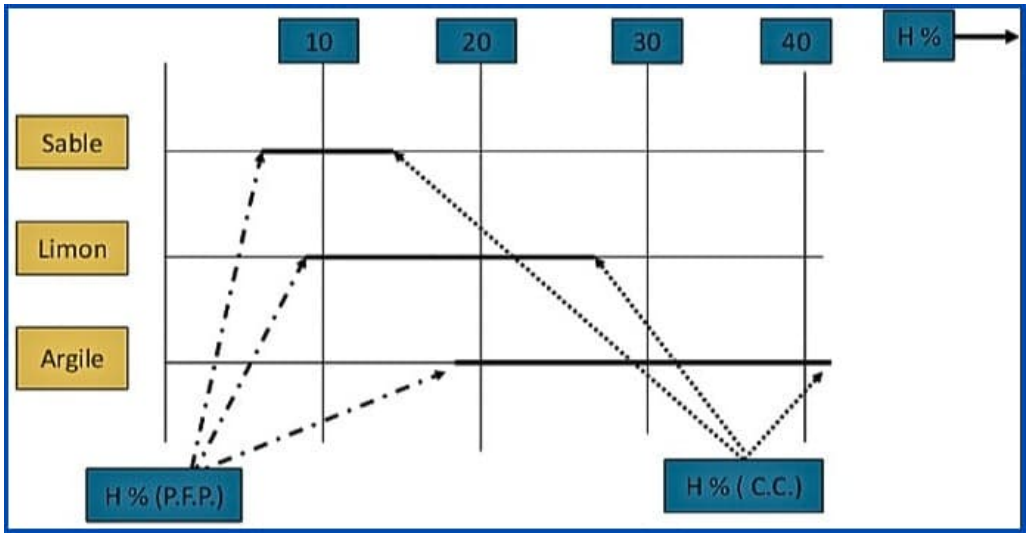


FIGURE 4.3 – Variabilité d'humidité du sol en fonction de la classe texturale [9]

point de flétrissement permanent est forte, plus la valeur de l'humidité à la capacité au champ est grande, alors que plus l'intervalle d'humidité entre le point de flétrissement permanent et la capacité au champ est grand (Figure**??**). L'eau se déplace toujours des zones de potentiel hydrique les plus élevées vers les zones de potentiel hydrique les plus bas (les plus négatifs), cela indique que le potentiel hydrique est une grandeur qui détermine la direction des mouvements de l'eau. Il s'agit de la somme de plusieurs composantes, notamment :

• Le Potentiel de Pression (ou pression de turgescence), il maintient de la rigidité et de la forme des tissus végétaux (la turgescence), pour la croissance cellulaire et l'ouverture/fermeture des stomates.

• Le Potentiel Osmotique (ou potentiel soluté) qu'il est dû à la présence de solutés dans l'eau.

• Le Potentiel Matriciel qu'il est dû à l'adhérence de l'eau aux surfaces solides (comme les colloïdes du sol ou les matrices cellulaires).

4.6.2 Calcul de la réserve en eau du sol

La dose d'arrosage (dm) est la quantité d'eau apportée au sol cultivé à chaque arrosage, elle exprime la dose maximale remplissant la réservoir utilisable. Et qu'en principe, n'est jamais atteinte et doit rester une donnée théorique servant de base au calcul de la dose pratique dp [5].

Le sol peut être décomposé en deux parties : le sol sec, et les interstices de différentes tailles qui peuvent être remplis d'eau ou d'air (Figure**??**), où :

• L'eau gravitaire est très faiblement liée, elle remplit les plus gros pores et s'écoulera vers la nappe phréatique (Figure 4.4).

• RU(mm) est l'eau accessible aux végétaux dans le volume de sol exploité par leurs racines [5]. L'intervalle d'humidité entre les seuils de potentiel 0.3 et 16 bars est d'autant plus fort que la granulométrie d'un sol est faible (Figure**??**) [9]. Après ressuyage de l'eau en excès (Figure4.4), le sol humide retiendra l'eau qui est à un potentiel hydrique de moins de -0.3 bars (-0.03 MPa).

Pour affiner la gestion de l'eau, la réserve utile est souvent subdivisée :

1. Réserve Facilement Utilisable 'RFU' : l'eau y est extraite avec un faible effort par la plante, c'est souvent présentée comme suit :

$$RFU = dp = y.RU = y.dm = y.EU.Z_r = y.\frac{(H_{vr} - H_{vf})}{100}.Z_r \tag{4.10}$$

• y : degré de tarrissement. Ce coefficient représente le risque potentiel de soumettre la plante à un stress hydrique et est fonction de la culture [5]. Sa valeur de $\frac{1}{3}$ à $\frac{2}{3}$, cette proportion dépend fortement du type de sol, de la culture et des conditions climatiques.

• RU : réserve utile en mm, sa valeur dépend de la texture du sol, le taux de matière organique, et la profondeur d'enracinement 'Z_r' ;

• dm : dose d'arrosage en mm ;

• dp : dose pratique en mm ;

• EU : teneur en eau utile en % ;

• Z_r : profondeur d'enracinemen en % ;

• H_{vr} : humidité volumétrique à la capacité de rétention en%, c'est la teneur maximale en eau que le sol peut retenir contre la force de gravité, après un drainage complet (ressuyage), généralement 1 à 3 jours après une pluie abondante ou une irrigation. À cette teneur, l'eau est retenue par les forces capillaires, mais elle est facilement disponible pour les racines.

• H_{vf} : humidité volumétrique au point de flétrissemen en%, c'est la teneur minimale en eau du sol en dessous de laquelle la plante ne peut plus extraire l'eau car elle est trop fortement liée aux particules du sol. La plante se flétrit de manière irréversible et meurt si cet état persiste.

D'autre part :

$$H_{vr} = Da.H_{pr} \quad et \quad H_{vf} = Da.H_{pf} \tag{4.11}$$

• H_{pr} : humidité pondérale à la capacité de rétention en %, c'est le rapport entre le poids d'eau d'un échantillon et son poids sec à la point de la capacité de rétention ;

• H_{pf} : humidité pondérale au point de flétrissement en % ;

• Da : densité apparente, c'est le rapport entre la masse sèche et le volume total (solides + pores) d'un échantillon.

Alors :

$$RFU = \frac{H_{pr} - H_{pf}}{100} \times Da \times Z_r \times y \tag{4.12}$$

2. Réserve Difficilement Utilisable 'RDU' : la portion située entre entre la limite inférieure de la RFU et le PFP, l'eau y est extraite avec un effort croissant par la plante.

• Les plantes arrivent à extraire, par leurs racines, l'eau liée jusqu'à des potentiels voisins de -16 bars (-1.6 MPa).

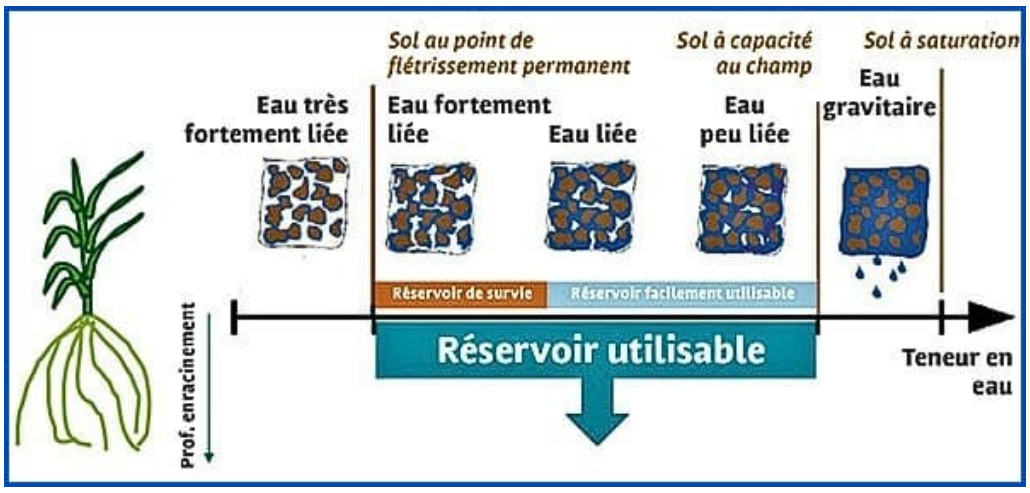


FIGURE 4.4 – Relation entre la teneur en eau du sol et le potentiel hydrique (Capacité au champ, Point de flétrissement).

4.7 Evaluation des besoins en eau

4.7.1 Les besoins nets des cultures choisies

Le besoin net représente la quantité minimale d'eau qu'il faut apporter directement à la plante (Figure4.5), au niveau de la parcelle. Il s'agit du volume d'eau qui doit réellement atteindre la zone racinaire pour combler le déficit hydrique.

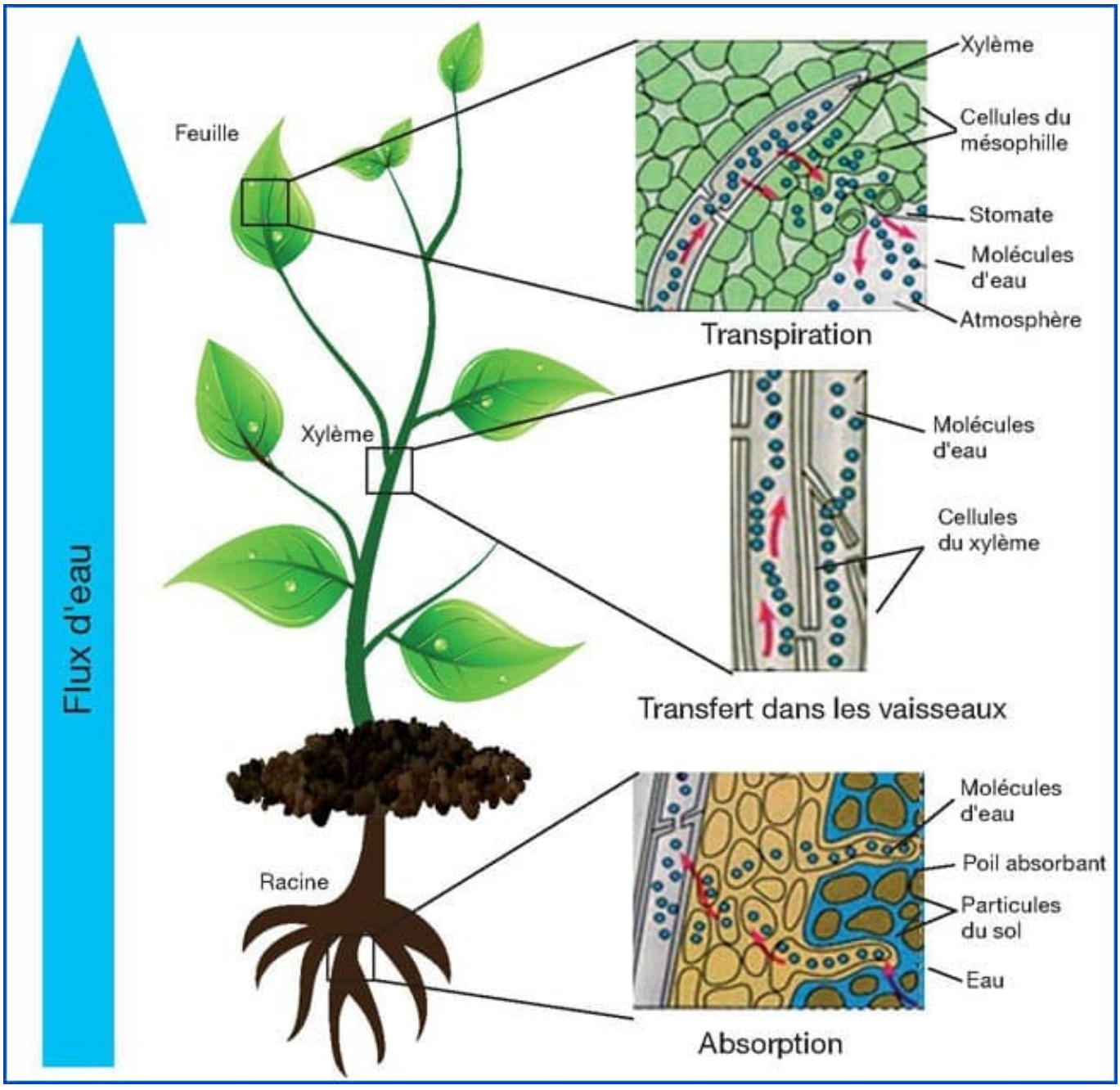


FIGURE 4.5 – Le flux d'eau de la racine à la feuille chez les plantes

□ **Source : Open Edition books.**

L'eau de pluie est en grande partie stockée dans le sol ; ce qui ne l'est pas s'écoule latéralement par ruissellement superficiel [9]. L'eau absorbée par le sol sert à l'extraction par les racines pour

entretenir l'évapotranspiration réelle des plantes, elle également sert à l'évaporation directe de l'eau à la surface du sol humide (Figure4.6).

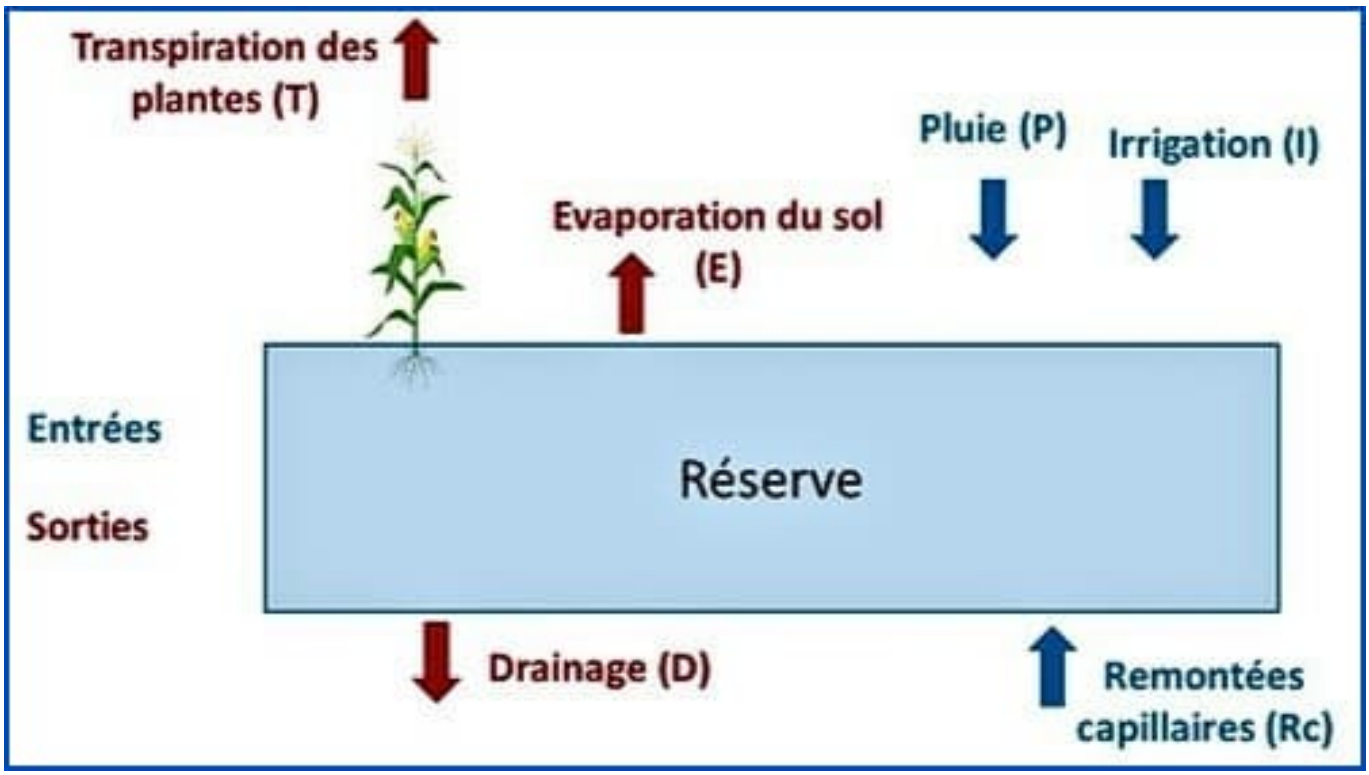


FIGURE 4.6 – Représentation classique des composantes du bilan hydrique d'un système sol-plante.

☐ **Source :** bonnespratiques-eau.fr

L'évaluation des besoins nets de chaque culture se fait en analysant le bilan hydrique suivant :

$$B_{net.i} = ETM_i - (P_{eff.i} + \Delta R_{i-1}) = ETM_i - (P_{eff.i} + K \times RFU_{i-1}) \tag{4.13}$$

- ETM_i : besoin en eau de la culture pour la période i ;
  - $P_{eff.i}$: pluie efficace pour la période i ;
  - ΔR_{i-1} : contribution de l'eau stockée dans le sol restante du mois précédent. ;
  - K : cœfficient pour calculer la quantité d'eau puisée dans la RFU ;
  - RFU_{i-1} : réserve facilement utilisable restante à la fin de la période i-1.

◇ Les calculs des besoins en eau des cultures choisées sont résumés dans les tableaux suivants :

TABLE 4.8 – Besoins en eau de L'Oignon

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	-	-	-	-	-	-
O	14.87	5.42	0.7	117.61	0.3	40.37	0.00	**102.74**
N	20.42	3.70	1.1	122.10	0.4	52.76	0.00	101.68
D	17.23	2.72	1.1	92.75	0.5	65.95	0.00	75.72
Ja	19.69	2.74	0.9	76.45	0.6	79.14	0.00	56.76
F	8.50	3.83	0.85	94.41	0.7	92.32	0.00	85.91
M	21.48	5.48	-	-	-	-	-	-
A	15.67	7.48	-	-	-	-	-	-
M	10.27	9.29	-	-	-	-	-	-
J	3.38	10.33	-	-	-	-	-	-
Jt	8.17	10.77	-	-	-	-	-	-
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.9 – Besoins en eau de Haricot vert

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	0.4	92.88	0.1	13.46	0.00	63.58
O	14.87	5.42	0.7	117.61	0.15	20.18	0.00	**102.74**
N	20.42	3.70	0.95	105.45	0.2	26.91	0.00	85.03
D	17.23	2.72	0.9	75.89	0.3	40.37	0.00	58.66
Ja	19.69	2.74	-	-	-	-	-	-
F	8.50	3.83	-	-	-	-	-	-
M	21.48	5.48	-	-	-	-	-	-
A	15.67	7.48	-	-	-	-	-	-
M	10.27	9.29	-	-	-	-	-	-
J	3.38	10.33	-	-	-	-	-	-
Jt	8.17	10.77	-	-	-	-	-	-
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.10 – Besoins en eau du Piment et Poivrant

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	-	-	-	-	-	-
O	14.87	5.42	-	-	-	-	-	-
N	20.42	3.70	-	-	-	-	-	-
D	17.23	2.72	-	-	-	-	-	-
Ja	19.69	2.74	-	-	-	-	-	-
F	8.50	3.83	0.6	66.64	0.4	52.76	0.00	58.14
M	21.48	5.48	0.9	152.89	0.6	79.14	0.00	131.40
A	15.67	7.48	0.95	213.18	0.8	105.51	0.00	197.51
M	10.27	9.29	0.95	273.59	0.8	115.70	0.00	**263.32**
J	3.38	10.33	0.85	263.42	0.9	128.56	0.00	260.04
Jt	8.17	10.77	-	-	-	-	-	-
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.11 – Besoins en eau du Tomate

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	-	-	-	-	-	-
O	14.87	5.42	-	-	-	-	-	-
N	20.42	3.70	-	-	-	-	-	-
D	17.23	2.72	0.4	33.73	0.2	26.91	0.00	16.50
Ja	19.69	2.74	0.7	59.46	0.5	65.95	0.00	39.77
F	8.50	3.83	0.95	105.52	0.7	92.32	0.00	97.02
M	21.48	5.48	1.05	178.37	0.9	115.70	0.00	156.89
A	15.67	7.48	0.8	179.52	1	128.56	0.00	163.85
M	10.27	9.29	0.7	201.59	1	128.56	0.00	**191.32**
J	3.38	10.33	-	-	-	-	-	-
Jt	8.17	10.77	-	-	-	-	-	-
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.12 – Besoins en eau de Courgette

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	-	-	-	-	-	-
O	14.87	5.42	-	-	-	-	-	-
N	20.42	3.70	-	-	-	-	-	-
D	17.23	2.72	-	-	-	-	-	-
Ja	19.69	2.74	-	-	-	-	-	-
F	8.50	3.83	-	-	-	-	-	-
M	21.48	5.48	0.7	118.92	0.3	40.37	0.00	97.43
A	15.67	7.48	0.95	213.18	0.4	52.76	0.00	197.51
M	10.27	9.29	1	287.99	0.5	65.95	0.00	277.72
J	3.38	10.33	1	309.90	0.7	92.32	0.00	**306.52**
Jt	8.17	10.77	0.8	267.10	0.7	92.32	0.00	258.93
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.13 – Besoins en eau de l'Orge vert

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	-	-	-	-	-	-
O	14.87	5.42	0.3	50.41	0.2	39.72	0.00	35.54
N	20.42	3.70	0.7	77.70	0.3	59.58	0.00	57.28
D	17.23	2.72	0.7	59.02	0.4	69.97	0.00	41.79
Ja	19.69	2.74	1.05	89.19	0.5	87.46	0.00	69.50
F	8.50	3.83	1.05	116.62	0.6	104.95	0.00	108.12
M	21.48	5.48	1.05	178.37	0.7	122.44	0.00	**156.89**
A	15.67	7.48	0.65	145.86	0.7	122.44	0.00	130.19
M	10.27	9.29	-	-	-	-	-	-
J	3.38	10.33	-	-	-	-	-	-
Jt	8.17	10.77	-	-	-	-	-	-
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.14 – Besoins en eau du Blé tendre + dure

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	-	-	-	-	-	-
O	14.87	5.42	0.3	50.41	0.2	39.72	0.00	35.54
N	20.42	3.70	0.7	77.70	0.3	59.58	0.00	57.28
D	17.23	2.72	0.7	59.02	0.4	69.97	0.00	41.79
Ja	19.69	2.74	1.05	89.19	0.5	87.46	0.00	69.50
F	8.50	3.83	1.05	116.62	0.6	104.95	0.00	108.12
M	21.48	5.48	1.05	178.37	0.7	122.44	0.00	**156.89**
A	15.67	7.48	0.65	145.86	0.7	122.44	0.00	130.19
M	10.27	9.29	-	-	-	-	-	-
J	3.38	10.33	-	-	-	-	-	-
Jt	8.17	10.77	-	-	-	-	-	-
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.15 – Besoins en eau de la Pomme de terre

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	-	-	-	-	-	-
O	14.87	5.42	-	-	-	-	-	-
N	20.42	3.70	-	-	-	-	-	-
D	17.23	2.72	-	-	-	-	-	-
Ja	19.69	2.74	-	-	-	-	-	-
F	8.50	3.83	-	-	-	-	-	-
M	21.48	5.48	0.75	127.41	0.3	59.59	0.00	105.92
A	15.67	7.48	1.1	246.84	0.4	69.67	0.00	231.17
M	10.27	9.29	1.2	345.59	0.5	87.46	0.00	**335.32**
J	3.38	10.33	0.75	232.43	0.6	104.95	0.00	229.05
Jt	8.17	10.77	-	-	-	-	-	-
At	2.08	9.84	-	-	-	-	-	-

TABLE 4.16 – Besoins en eau de l'Olivier

Mois	P_{eff}(mm)	ET_0(mm)	Kc	ETM (mm)	Z(m)	$RFU_{théo}$ (mm)	$RFU_{réel}$(mm)	B_{net}(mm)
S	29.29	7.74	0.65	150.93	1.2	15.43	0.00	121.63
O	14.87	5.42	0.66	110.89	1.2	15.43	0.00	96.02
N	20.42	3.70	-	-	-	-	-	-
D	17.23	2.72	-	-	-	-	-	-
Ja	19.69	2.74	-	-	-	-	-	-
F	8.50	3.83	-	-	-	-	-	-
M	21.48	5.48	-	-	-	-	-	-
A	15.67	7.48	0.7	157.08	1.2	15.43	0.00	141.41
M	10.27	9.29	0.7	201.59	1.2	15.43	0.00	**191.32**
J	3.38	10.33	0.58	179.74	1.2	15.43	0.00	176.36
Jt	8.17	10.77	0.5	166.94	1.2	15.43	0.00	158.77
At	2.08	9.84	0.5	152.52	1.2	15.43	0.00	150.44

◇ Les calculs des besoins en eau en mm pour les assolements 1 et 2 sont résumés dans les tableaux suivants :

TABLE 4.17: Besoins en eau en mm pour l'assolement 1.

Mois	Blé	Blé	Oignon	P de t(S)	Tomate	Pim et poiv	P de t(AS)	Olivier	Totale
S	-	-	-	-	-	-	-	121.63	121.63
O	35.54	35.54	102.74	-	-	-	-	96.02	269.84
N	57.28	57.28	101.68	-	-	-	-	-	216.24
D	41.79	41.79	75.72	-	16.50	-	-	-	175.80
J	69.50	69.50	56.76	-	39.77	-	-	-	235.53
F	108.12	108.12	85.91	-	97.02	58.14	-	-	457.31
M	156.89	156.89	-	105.92	156.89	131.40	105.92	-	813.91
A	130.19	130.19	-	231.17	163.85	197.52	231.17	141.41	1 225.50
M	-	-	-	335.32	191.32	263.32	335.32	191.32	1 316.60
J	-	-	-	229.05	-	260.04	229.05	176.36	894.50
Jt	-	-	-	-	-	-	-	158.77	158.77
At	-	-	-	-	-	-	-	150.44	150.44

TABLE 4.18 – Besoins en eau en mm pour l'assolement 2

Mois	Orge	P de t(S)	Tomate	Haricot vert	Oignon	Courgette	Tomate	Olivier	Totale
S	-	-	-	63.58	-	-	-	121.63	185.21
O	35.54	-	-	102.74	102.74	-	-	96.02	337.04
N	57.28	-	-	85.03	101.68	-	-	-	243.99
D	41.79	-	16.50	58.66	75.78	-	16.50	-	209.23
J	69.50	-	39.77	-	56.76	-	39.77	-	205.80
F	108.12	-	97.02	-	85.91	-	97.02	-	388.07
M	156.89	105.92	156.89	-	-	97.43	156.89	-	674.02
A	130.19	231.17	163.85	-	-	197.51	163.85	141.41	1 027.98
M	-	335.32	191.32	-	-	277.72	191.32	191.32	1 187.00
J	-	229.05	-	-	-	306.52	-	176.36	711.93
Jt	-	-	-	-	-	258.93	-	158.77	417.70
At	-	-	-	-	-	-	-	150.44	150.44

4.8 Calcul du débit fictif continu moyen, et du début caractéristique

Les besoins des cultures sont très variables au cours de la période végétative. Alors que le débit commence à un niveau bas, il augmente fortement au printemps et au début de l'été pour atteindre son maximum pendant les mois les plus secs, puis il diminue rapidement en fin de période. Ayant la quantité totale en eau d'appoint qu'un hectare d'une certaine culture nécessaire au cours des 06 mois de sa période végétative, on peut la donner en terme de débit constant pendant cette période [5]. Ce qui exprime le débit fictif continu où :

$$q_s = \frac{10^4 \times \text{besoin mensuel maximum brute}}{3600 \times T \times t} = \frac{10^4 \times \text{Besoin mensuel maximum net}}{3600 \times T \times t \times E_a} \qquad (4.14)$$

• Besoin brut en mm, c'est la quantité totale d'eau qui doit être introduite en tête du réseau d'irrigation pour pouvoir satisfaire les besoins nets de la plante, en compensant les pertes inévitables ;

• Besoin mensuel maximum net en mm ;

• T : durée journalière d'irrigation ;

• t : nombre de jours du mois d'irrigation, c'est égale à 30 Jours ;

• E_a : cœfficient d'efficience d'application, c'est le cœfficient le plus critique pour l'agriculteur et se concentre sur les pertes au niveau de la parcelle.

Lorsque :

• L'irrigation gravitaire (surface) $\implies E_a \in [40\% \sim 60\%]$

• L'irrigation par aspersion $\implies E_a \in [65\% \sim 75\%]$

• L'irrigation par goutte-à-goutte (micro-irrigation) $\implies E_a \in [85\% \sim 95\%]$

Alors : $q_s = \frac{10^4 \times 1316.60}{3600 \times 24 \times 30 \times 0.75} \implies q_s = 6.77 \quad l/s/ha$!

Cette valeur du débit spécifique dépasse les normes (1.5 l/s/ha), pour cela il doit évaluer une autre valeur pour éviter le surdimensionnement. Il existe trois méthodes différentes pour estimer le début spécifique, on peut prendre :

- La moyenne des débits spécifiques de l'ensemble des cultures ;
- Le débit spécifique de la culture la plus exigeante
- Le moyen des débits spécifiques des cultures les plus exigeantes

On prend le débit spécifique de la culture la plus exigeante, dans ce cas c'est la pomme de terre où le besoin net est égal à 335.32 mm.

Alors : $q_s = \frac{10^4 \times 335.32}{3600 \times 24 \times 30 \times 0.75} \implies q_s = 1.72 \quad l/s/ha$, c'est supérieure a 1.5 l/s/ha.

Dans ce cas, on utilise la moyenne pondérée par les surfaces des débits spécifiques de l'ensemble des cultures, c'est la méthode la plus réaliste pour dimensionner le réseau de drainage, car toutes les cultures n'atteignent pas leur pic de besoin (ETM) exactement au même moment. Pour ce calcul, on utiliser la formule du besoin net moyen pondéré suivante :

$$B_{\text{moyen pondéré}} = \frac{\sum(B_{\text{net max i}} \times S_i)}{\sum S_i} \tag{4.15}$$

◇ Les résultats du calcul sont résumées dans le tableau suivant : Alors : $B_{\text{moyen pondéré}} = \frac{68\,675{,}80}{335} \approx$

Culture	$B_{\text{net max i}}$ (mm)	S_i (ha)	$B_{\text{net max i}} \times S_i$
Olivier	191,32	28	5356,96
P de t	335,32	19.25	6454,91
Orge vert	156,89	16.5	2588,68
Blé Tendre/Dur	156,89	19.25	3020,13
Courgette	306,52	56	17165,12
Tomate	191,32	56	10713,92
Piment / Poivron	263,32	56	14745,92
Haricot vert	102,74	42	4315,08
Oignon	102,74	42	4315,08
TOTAL	—	335	68 675,80

204, 97 mm/mois On utilise ce résultat pour calculer la nouvelle valeur du début spécifique : $q_s = \frac{10^4 \times 204{,}97}{3600 \times 24 \times 30 \times 0{,}75} \approx \mathbf{1, 05}$ l/s/ha Ce résultat est conforme à la norme. • Pour définir le débit maximum que le système de desserte aura à fournir pour irriguer toutes les parcelle, on applique la formule suivante :

$$q_c = q_s \times S_t \tag{4.16}$$

Alors : $q_c = 1.05 \times 335 \implies q_c = 351.75\, l/s$

4.9 La fréquence et l'espacement d'arrosage

$$N = \frac{B_{brut}}{\text{RFU}} \tag{4.17}$$

- B_{brut} : besoins bruts de la culture la plus exigeante durant le mois de pointe ;
- RFU : réserve facilement utile de la culture la plus exigeante durant le mois de pointe.

Alors : $N = \frac{335.32}{87.46} = 3.83 \implies N = 4 \quad$ fois

$$\text{Ess} = \frac{\text{Nombre de jour de mois}}{N} \tag{4.18}$$

Alors : $Ess = \frac{30}{4} = 7.5 \implies Ess = 7 \quad$ jours

4.10 Lessivage

4.10.1 Tolérance des cultures aux sels

Généralement, l'accumulation de sels dans les tissus de plantes au-dessus de la normale va causer une certaine inhibition de la création et du rendement [5].

Où les racines se concentrent dans la couche supérieure de la zone racinaire, l'absorption de l'eau est élevée, et la salinité moyenne pondérée est influencée plus par la salinité de la couche supérieure de la zone racinaire plutôt que par la salinité la plus élevée qui se trouve à la base de la zone racinaire. Alors l'utilisation du concept de salinité moyenne pondérée donne plus de signification à la conductivité électrique de l'eau d'irrigation en terme d'effets sur la croissance de la plante.

4.10.2 Bilan de salinité et besoin en lessivage

La salinisation des sols résulte de l'accumulation excessive de sels solubles dans la zone racinaire, ce qui nuit à la croissance des plantes. Voici les principaux sels impliqués :

• Molécules : chlorure de sodium (NaCl) est le plus courant et le plus problématique, car le sodium (Na^+) est le plus destructeur ; il provoque la dispersion des particules d'argile, ce qui réduit la porosité et freine l'infiltration de l'eau, et il favorise la sodisation qu'elle est une forme aggravée de salinisation. Sulfate de sodium (Na_2SO_4), chlorure de calcium ($CaCl_2$), sulfate de calcium ($CaSO_4$), chlorure de magnésium ($MgCl_2$), sulfate de magnésium ($MgSO_4$), sélénium (Se), silicium (Si) et bore (Br).

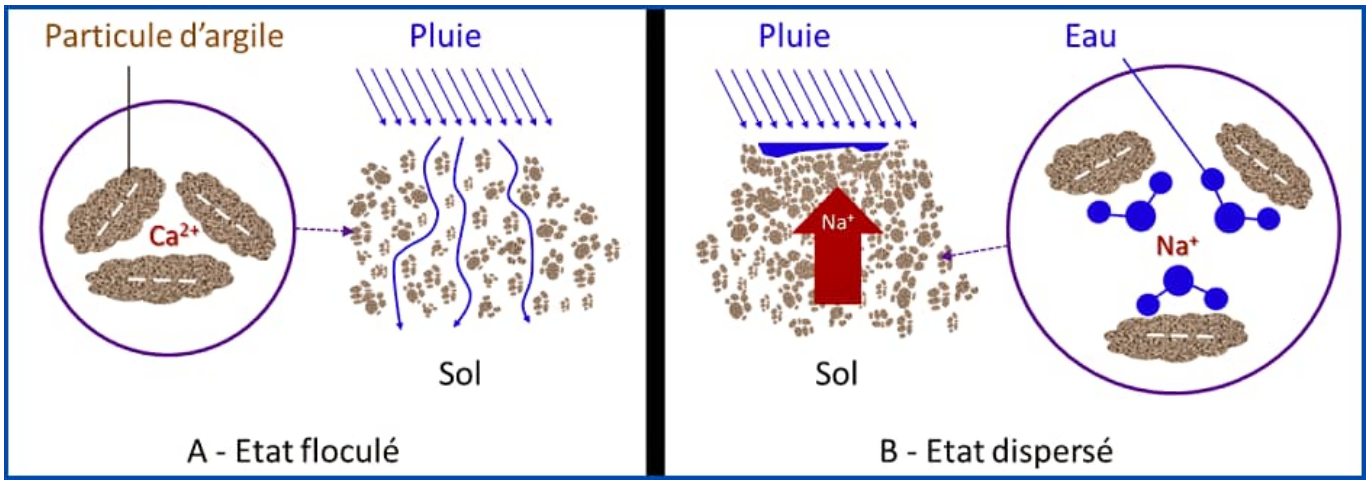


FIGURE 4.7 – Impact des ions du sodium (Na^+) sur la dispersion de l'argile et la perméabilité du sol

□ **Source :** • Anions : bicarbonates (HCO_3^-) et carbonates (CO_3^{2-}) qu'ils peuvent augmenter le pH du sol, chlore, sulfate et nitrate.

• Cations : sodium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), et lithium (Li^+).

La variation de stock de sel dans le profil de sol considéré peut s'écrire :

$$I_w.C_i - D_w.C_d + S_a + S_s + S_p + S_e = \Delta S \tag{4.19}$$

- I_w : volume d'eau d'irrigation ;
- C_i : concentration en sels de I_w ;
- D_w : volume d'eau de drainage, volume qui percole en profondeur sous la zone racinaire ;

- C_d : la concentration en sels de D_w ;
- S_s : quantité de sels mis en solution par l'eau traversant le sol ;
- S_p : quantité des sels précipités par l'eau ;
- S_e : quantité de sels consommée par la plante ;
- S_a : quantité de sels apportée part les engrais ou amendements, Le modèle le plus simple consiste à supposer :$Sa + Ss + Sp + Se = 0$. Si on souhaite maintenir un équilibre permanent ou semi permanent du niveau de salinité du sol :

$$I_w.C_i - D_w.C_d = \Delta S = 0 \implies \frac{D_w}{I_w} = \frac{C_i}{C_d} = \frac{CE_{iw}}{CE_{dw}} = LR \tag{4.20}$$

Exigence de lixiviation (*leaching requirement* **"LR"**) : c'est la quantité minimale d'eau qui devrait percoler en profondeur (par rapport au total apporté) pour maintenir l'équilibre salin à un niveau donné [4]. On aura : $I_w = ETM + D_w$, alors : $LR = \frac{D_w}{ETM+D_w}$

Les travaux de Bernstein ont jeté les bases conceptuelles et expérimentales sur lesquelles les modèles de lessivage modernes, y compris celui de Rhoades, ont été construits. Une simplification courante, dérivée des travaux de Rhoades, utilise la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée du sol 'CE_{es}' comme seuil de tolérance pour la culture comme suit :

$$LR = \frac{CE_{iw}}{5CE_{es} - CE_{iw}} \tag{4.21}$$

- CE_{iw} : conductivité électrique d'eau d'irrigation ;
- CE_{es} : valeur de la table de tolérance qui provoquerait une chute de rendement de 10%max (Annexe).

Alors : $LR = \frac{0.58}{5\times1.3-0.58} = 0.09797 \implies LR = 9.8\%$

L'apport d'eau total à assurer pour satisfaire les besoins en eau des plantes et de lessivages est :

$$V = ETM \times \frac{LR_{eff}}{1 - LR_{eff}} = ETM \times \frac{\frac{LR}{L_e}}{1 - \frac{L_R}{L_e}} \tag{4.22}$$

- Le : efficience de lessivage, on prend : $L_e = 90\%$.

Sols fissurés $\implies Le = 30\%$

Sols à texture moyenne $\implies Le \in [50 - 60\%]$

Sols sableux $\implies Le \in [90 - 100\%]$

Alors : $V = ETM \times \frac{\frac{9.8}{90}}{1-\frac{9.8}{90}} = \frac{0.11}{1-0.11} \times ETM$

◇ Les doses de lessivage essentieles pour les cultures au niveau de la zone 2 sont résumées dans le tableau suivant :

TABLE 4.19 – Doses de lessivage en mm

Cultures	**S**	**O**	**N**	**D**	**Ja**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**Jt**	**At**
Blé	-	6.23	9.60	7.29	11.02	14.41	22.05	18.03	-	-	-	-
P de t (S)	-	-	-	-	-	-	15.75	30.51	**42.71**	28.73	-	-
P de t (AS)	-	-	-	-	-		15.75	30.51	**42.71**	28.73	-	-
Orge vert	-	6.23	9.60	7.29	11.02	14.41	22.05	18.03	-	-	-	-

table

4.10.3 Le début a évacuer dans le cas où l'excès d'eau provient du lessivage

$$q_c = \frac{V}{Ess \times N} \tag{4.23}$$

- V : dose maximale du lessivage en mm, sa valeur est de 42.71 mm ;
- Ess : espacement d'arrosage, sa valeur est de 7 jours ;
- N : fréquence d'irrigation, sa valeur est de 4 fois par mois.

Alors : $q_c = \frac{42.71}{7\times4} \implies q_c = 0.59$ mm/jour

4.11 Estimation des volumes d'eau d'irrigation

◇ Les volumes totaux d'irrigation pour les deux assolements sont résumés dans les tableaux suivants :

TABLE 4.20 – Volume totale pour l'assolement 1

Cultures	**Surface(Ha)**	$B_{\text{net}}(m^3/h)$	$B_{\text{brut}}(m^3/h)$	$B_{\text{lessivage}}(m^3/h)$	$B_{\text{total}}(m^3)$
Blé	19.25	5 993.10	7 990.80	886.30	170 884.18
Blé	19.25	5 993.10	7 990.80	886.30	170 884.18
Oignon	42	4 228.70	5 638.27	0.00	236 807.34
P de t(S)	19.25	9 014.60	12019.47	1177.00	254 032.05
Tomate	56	6 653.50	8 871.33	0.00	496 794.48
Pim et poiv	56	9 104.20	12 138.93	0.00	679 780.08
P de t	19.25	9 014.60	12 019.47	1177.00	254 032.05
Olivier	28	10 359.50	13 812.67	0.00	386 754.67

TABLE 4.21 – Volume totale pour l'assolement 2

Cultures	**Surface(ha)**	$B_{\text{net}}(m^3/h)$	$B_{\text{brut}}(m^3/h)$	$B_{\text{lessivage}}(m^3/h)$	$B_{\text{total}}(m^3)$
Orge	16.5	5 993.10	7 990.80	886.30	146 472.15
P de t (S)	19.25	9014.60	12 019.47	1177.00	254 032.05
Tomate	56	6 653.50	8 871.33	0.00	496 794.48
Haricon vert	42	3100.10	4 133.47	0.00	173 605.74
Oignon	42	4 228.70	5 638.27	0.00	236 807.34
Courgette	56	11381.10	15 174.80	0.00	849 788.80
Tomate	56	6 653.50	8 871.33	0.00	496 794.48
Olivier	28	10 359.50	13 812.67	0.00	386 754.76

◇ Un recupitilatif des résultats obtenus dans ce chapitre est présenté dans le tableau suivant :

TABLE 4.22 – Récapitulatif des résultats concernant les besoins en eau et le lessivage

Désignation	Symbole	Unités	Valeur
Début spécifique	q_s	l/s/ha	1.05
Début caractéristique	q_c	l/s	351.75
Volume d'irrigation pour l'assolement 1	V_{total}	m^3	2 649 969.03
Volume d'irrigation pour l'assolement 2	V_{total}	m^3	3 041 049.80
Fréquence d'irrigation	N	fois/mois	4
Espacement d'arrosage	Ess	jour	7
leaching requirement	LR	%	9.8
Dose maximale de lissivage	V	mm	42.71
Début à évacuer	q_c	mm/j	0.59

4.12 Conclusion

Le volume total des besoins en eau des cultures de ce périmètre est de **2 649 969.03** m^3 pour l'assolement 1, et de **3 041 049.80** m^3 pour l'assolement 2, en revanche, le volume d'eau stocké dans le barrage de Mestaoua est **6.57** Hm^3. Donc la retenue est valable de satisfaire les besoins de ce périmètre sans problème.

Chapitre 5

Dimensionnement, et Diagnostic de l'efficacité du réseau de drainage



5.1 Introduction

Le système de drainage enlève les excès d'eau et l'accumulation des sels solubles dans la zone racinaire, et évacuant ces excès de manière sécuritaire. Ce chapitre donne un aperçu des principes généraux qui gouvernent les déplacements de l'eau dans les terres cultivées, ainsi que le captage et l'évacuation de l'eau par un système de drainage [6].

5.2 La base de calcul d'un réseau de drainage

Pour autant que la couche dans laquelle les drains sont installés soit profonde, les lignes de flux s'étendront en dessous du niveau des drains (Figure5.1). La différence de hauteur 'h' entre le sommet de la nappe à mi-chemin entre deux drains et le niveau des drains constitue la charge (la force motrice) responsable de l'écoulement de l'eau de la nappe vers les drains ; c'est ce qui fait que l'importance du rabattement de la nappe sera fonction de la profondeur d'installation sous le niveau de la nappe, de l'écartement entre les drains, des conditions climatiques et des propriétés du sol.

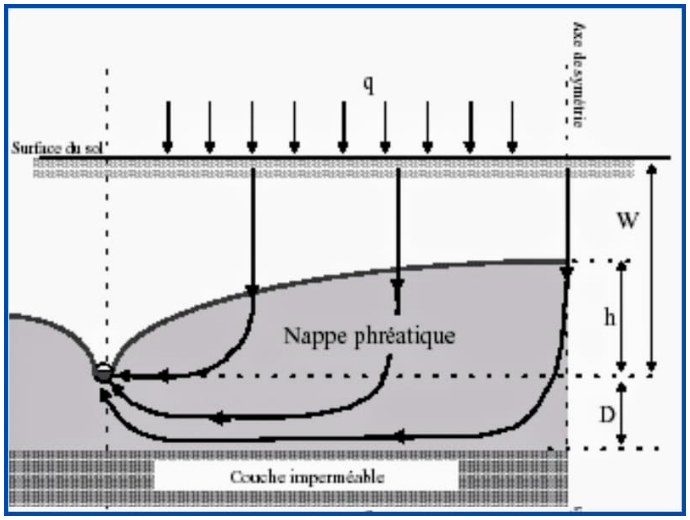


FIGURE 5.1 – Représentation schématique de l'écoulement des eaux depuis la surface du sol vers un drain souterrain.

□ **: Source : Cours du drainage.** La plupart des formules de calcul pour l'écartement des drains font appels à la présence d'une couche imperméable à une certaine profondeur sous le niveau d'installation des drains, dont la conductivité hydraulique à saturation est de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle du sol sous-jacent. La détermination de la profondeur de cette couche pose parfois problème lorsqu'il n'y a pas de couche imperméable proprement dite, et la précision des estimations en sera évidemment affectée.

5.3 Elaboration d'un projet de drainage par aqueduc enterré

5.3.1 Relevé topographique

C'est l'ensemble des opérations réalisées sur le terrain pour recueillir des données géométriques (positions, altitudes, dimensions). Cela permet de :

- Déterminer les pentes et la direction de l'écoulement de l'eau.
- Localiser les points bas (dépressions) ou les zones d'accumulation d'eau.
- Identifier les points d'exutoire (sortie du réseau de drainage).

5.3.2 Direction et pente des drains

Lorsque le drain fonctionne à plein régime, l'écoulement de l'eau dans ce drain doit se faire à une vitesse moyenne d'environ 0,2 m/s ; cette vitesse est nécessaire pour empêcher les dépôts et l'obstruction partielle du drain. Plus la vitesse de circulation de l'eau sera grande, moins on sera vulnérable à la sédimentation, et plus le diamètre du drain pourra être petit, donc moins cher. Il faut ainsi choisir des pentes plus appropriées. Voici quelques contraintes techniques concernant la pente qui doit être prise en compte :

• La pente minimale à donner aux drains est de 0,10%, mais dans la mesure du possible on gardera 0,15%(15 cm sur 100 m) ;

• Lorsque la pente du terrain est supérieure à 1,5% jusqu'à 2%, il faut obligatoirement placer les drains perpendiculairement à la pente.

5.3.3 Détermination des diamètres des drains :

• Ecoulement uniforme : ces équations sont applicables pour le dimensionnement de drains collecteurs, elles sont du type :

$$Q = a.d^b.i^c \tag{5.1}$$

- d : diamètre intérieur du tuyau (m) ;
- i : gradient hydraulique (m.m^{-1}) ;
- a, b et c : des cœfficients dépendant du type de tuyau.
- Pour des tuyaux lisses : a = 50, b = 2.71 et c = 0.57.
- Pour des tuyaux crénelés : a = 22, b = 2.67 et c = 0.5.

• Ecoulement non uniforme : ce type d'écoulement s'applique typiquement aux drains latéraux. l'équation (5.1) à peut être utilisée avec :

- Pour les tuyaux lisses : a = 89, b = 2.71, c = 0.57.
- Pour les tuyaux ondulés : a = 38, b = 2.67 et c = 0.50.

Dans ce cas, on fait l'hypothèse que :

1. Le drain est plein en tout point ;

2. Le gradient hydraulique moyen est parallèle au tuyau et donc égal à la pente d'installation du tuyau.

En pratique, l'utilisation de cette équation implique que l'eau sera sous une faible pression sur toute la longueur du drain à l'exception des deux bouts.

5.3.4 Ecartement des drains

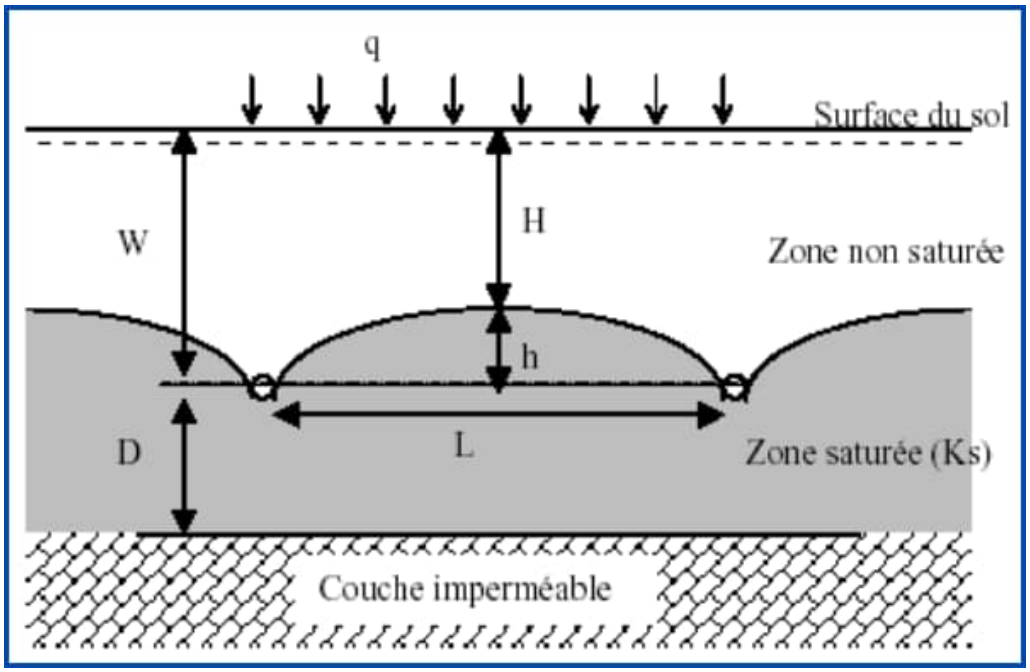


FIGURE 5.2 – Représentation schématique des principales variables pour la mise en place d'un réseau de drainage

□ **Source : Cours du drainage** Le calcul de l'écartement des drains nécessite au minimum la spécification des paramètres suivants :

La profondeur de la nappe minimale acceptable 'H' : cette profondeur doit être obtenue à mi-chemin entre deux drains, là où la nappe est la plus élevée, et cela selon le type de sol et de culture considéré (Figure5.2).

La profondeur d'installation des drains 'W' : le choix de la profondeur d'installation des drains conditionne la charge maximale 'h' disponible pour l'évacuation de l'eau vers les drains ; pour un même niveau de nappe, plus la profondeur d'installation des drains sera grande, plus la charge sera élevée, et plus les drains pourront être espacés tout en maintenant un débit uniforme au niveau des drains. En pratique, on cherchera à installer les drains le plus profondément possible, en fonction des conditions locales du terrain jusqu'à un maximum de 2 jusqu'à 2,5 mètres. De manière générale, il est souvent peu recommandé d'installer des drains à des profondeurs inférieures à 0.75 m, où le choix de la profondeur minimale d'installation est fonction de :

- La présence de couches peu perméables dans le sol ;
- Le risque de colmatage des drains par des racines, où le risque de gel.

La conductivité hydraulique de la zone saturée du sol 'K_s' :

D'après la loi de Darcy , la vitesse d'écoulement de l'eau vers un drain dépendra de la conductivité hydraulique du sol et du gradient de charge, alors pour assurer une même vitesse d'écoulement de l'eau vers les drains pour une perte de charge constante, plus la conductivité hydraulique sera faible, plus la distance à parcourir par l'eau devra être limitée.

- La couche de sol en dessous du niveau des drains doit avoir une conductivité hydraulique 'Ks' et/ou une épaisseur 'D' raisonnable où :

1. Si la valeur de $K_s \times D$ en dessous de la profondeur d'installation des drains est élevée, l'évacuation des excédents d'eau peut être obtenue même avec une charge faible et des espacements importants entre les drains ($> 50 \sim 100m$) ;

2. Si la valeur de $K_s \times D$ est faible, il est nécessaire de rapprocher les drains, ou de permettre une hauteur de charge h plus élevée pour maintenir des débits de drainage identique dans les drains.

- La charge totale de l'eau du sol doit être supérieure à celle de l'eau dans le drain, et l'eau dans le drain étant de l'eau libre à la pression atmosphérique.

Le régime d'apport d'eau en surface 'q' par les pluies, l'irrigation, ou par le ruissellement : ce paramètre correspond à la partie du flux d'infiltration de l'eau dans le sol qui contribue effectivement à la remontée de la nappe.

• En Algérie, on considère que régime pluvial le plus dominant au sahel est le régime permanant ; on cherche dans ce cas à maintenir la nappe en dessous d'un niveau maximum à ne pas dépasser. Ce régime est appliqué lorsque :

- Les pluies pondant les hivers et les printemps en particulier sont longues, fréquentes où le sol n'a pas le temps de se ressuyer complètement entre deux épisodes pluvieux ;
- Le sol est lourd et imperméable, qu'il ne permette pas de stockage temporaire et qu'a une faible infiltration ;
- Le débit de drainage étant en équilibre avec la réalimentation de la nappe ; Le débit de drainage (l'eau qui sort du système) est égal au débit de réalimentation (l'eau qui entre dans la nappe, par infiltration ou recharge). Le stockage est dû principalement à la combinaison de forte intensité des pluies et une faible perméabilité, alors on distingue deux cas : régime permanent avec stockage et l'autre sans stockage.

• Au contraire dans les hauts plateaux sahariens, le régime variable domine la région ; on cherche dans ce cas à obtenir un abaissement suffisant de la nappe dans un délai donné après la fin de la pluie. Le modèle applicable en régime variable décrit le suivant :

- Les pluies sont courtes avec une très forte intensité, et relativement espacées dans le temps ;
- Les sols sont plus perméables, ce qui permet une remontée temporaire de la nappe ainsi qu'une vidange assez rapide.

a. Ecoulement en régime permanent

Les hypothèses de Dupuit-Forchheimer sont des simplifications fondamentales utilisées pour modéliser l'écoulement de l'eau dans les nappes libres (non confinées). Elles permettent de transformer un problème complexe en un modèle mathématique plus facile à résoudre. Voici ces principales hypothèses :

- L'écoulement de l'eau dans la nappe est supposé strictement horizontal ; on néglige les composantes verticales du flux, cela est valable lorsque la pente de la nappe est faible, et que l'épaisseur de la nappe varie peu.
- La charge hydraulique constante sur la verticale ; cela signifie que la pression ne varie pas significativement avec la profondeur.
- La surface libre de la nappe (niveau piézométrique) est assimilée à une surface équipotentielle. Cela simplifie les calculs de débits et de profils de nappe.
- Le régime permanent ; l'écoulement est supposé stationnaire, pas de variation du niveau de la nappe ou du débit avec le temps. Cela permet d'utiliser des équations sans dérivées temporelles.
- Le milieu homogène et isotrope ; où la conductivité hydraulique est constante. Cela permet d'utiliser des équations simples comme celle de Darcy.

Première cas : Rabattement par drains reposant sur une couche imperméable, en régime d'alimentation

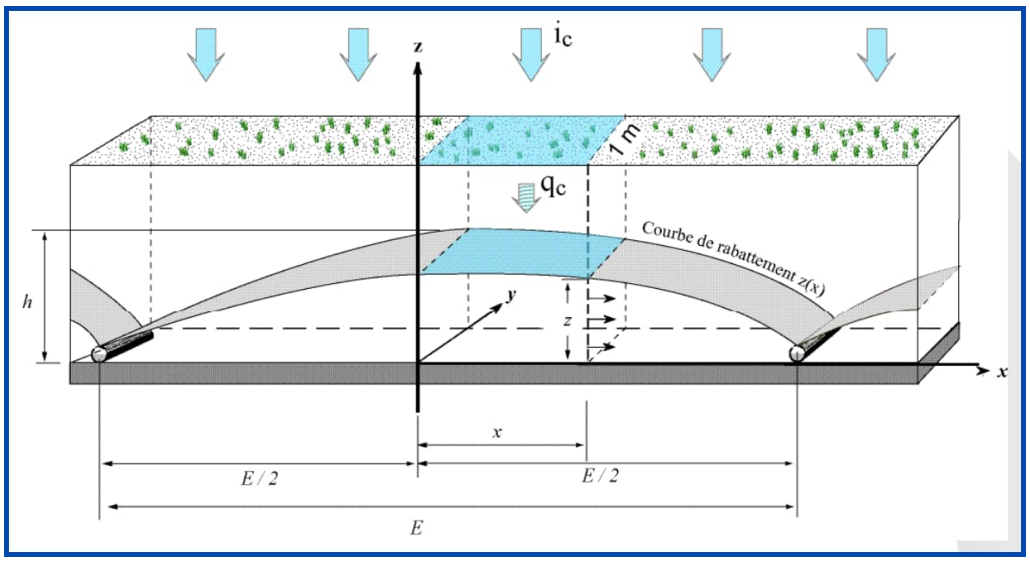


FIGURE 5.3 – Modélisation d'un écoulement souterrain dans une nappe libre [10]

Sous les hypothèses retenues, le flux en chaque point est donc proportionnel à la pente de la nappe, et l'écoulement unidimensionnel horizontal, pour lequel le flux vaut d'après la lois de Darcy :

$$q = -K\frac{dH}{dx} = -K\frac{dz}{dx} \quad alors : \quad Q_x = q_c x = -K\frac{dz}{dx}z \tag{5.2}$$

- q : flux ou débit par unité de surface $(m^3/jour/m^2)$;
- K : conductivité hydraulique à saturation ;
- H : charge hydraulique ;
- z(x) : courbe de dépression.

Après intégration :

$$q_c \int_0^x x dx = -K \int_h^z z dz \implies q_c \frac{x^2}{2} = -\frac{K}{2}(z^2 - h^2) \implies q_c.x^2 = K.h^2 - K.z^2 \tag{5.3}$$

1. Calcul de l'écartement E : on prend : $x = \frac{E}{2}$ et $z = 0$, soit d'après (5.3) :

$$q_c \frac{E^2}{4} = 2h\sqrt{\frac{K}{q_c}} \tag{5.4}$$

• On prend : $x = \frac{E}{2}$ et $z = h_e$, c'est le cas où la zone voisine des drains n'est pas suffisamment filtrante, soit :

$$E = 2\sqrt{\frac{K}{q_c}(h^2 - h_e^2)} \tag{5.5}$$

2. Equation de la courbe de rabattement :

D'après l'équation (5.3) :

$$\frac{q_c.x^2}{K.h^2} = 1 - \frac{z^2}{h^2} \tag{5.6}$$

Soit :

$$\frac{q_c.x^2}{qc.\frac{E^2}{4}} + \frac{z^2}{h^2} = 1 \implies \frac{4x^2}{E^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1 \tag{5.7}$$

• C'est une equation d'un cylindre de forme elliptique avec demi-grand-axe$\frac{E}{2}$, et demi-petit axe h.

Deuxième cas : Rabattement par drains ne reposant pas sur une couche imperméable, en régime perman

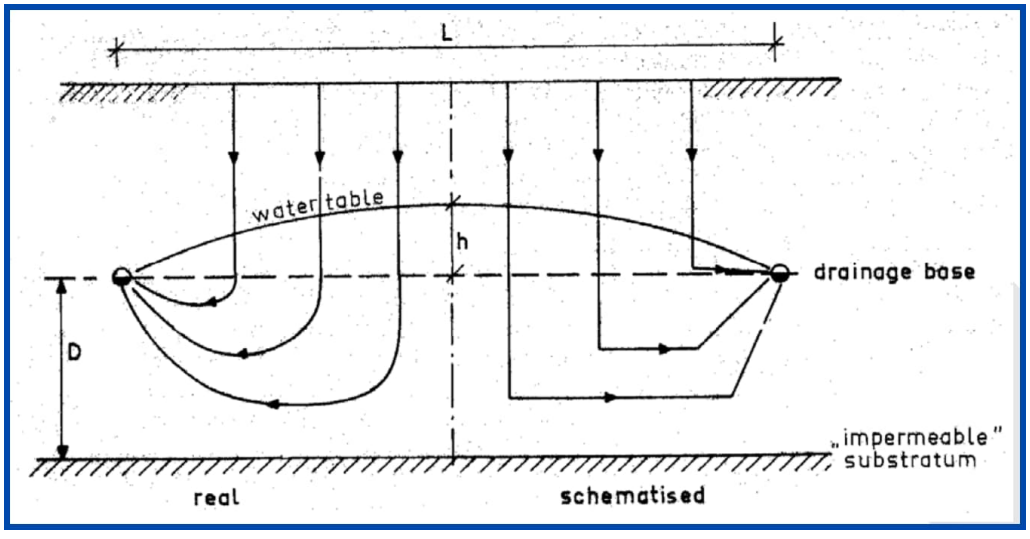


FIGURE 5.4 – Ecoulement effectif et schématisé vers des drains ne Ecoulement effectif et schématisé vers des drains ne reposant pas sur un substratum étanche [10]

La perte de charge totale en mètres est donnée par :

$$h = h_h + h_r = \frac{q \cdot L_h^2}{8K_s \cdot D_h} + q\frac{L}{\pi \cdot K_s} \ln \frac{a \cdot D_r}{u} \tag{5.8}$$

- L_h : Espacement entre les drains ou distance horizontale entre les points de mesure (m) ;
- D_h : Distance verticale depuis le niveau d'eau libre jusqu'au fond de la couche de sol perméable (m) ;
- q : Débit par unité de surface du sol ($m^3/jour/m^2$) ;
- L : Longueur du drain (m) ;
- K_s : Conductivité hydraulique saturée du sol (m/jour) ;
- a : constante sans unité, qui dépend du type de drain ou de la configuration du système de drainage.
- D_r : diamètre du drain ou rayon d'influence (m) ;
- u : coefficient dépend des caractéristiques du drain, comme son périmètre mouillé ou un paramètre géométrique lié à la surface de drainage.

Cette équation est relativement complexe, et Hooghoudt fit l'hypothèse que l'écoulement vers un drain pouvait être décrit dans un système analogue, pour autant que l'accroissement de la perte de charge horizontale suite à la réduction de l'épaisseur 'd' compense l'absence de perte de charge radiale. Dans cette hypothèse, l'équation (5.8) devient :

$$h = \frac{q \cdot E^2}{8K_s \cdot D_h^*} \tag{5.9}$$

Où : $D_h^* = d + \frac{h}{2}$, l'équation (5.9) peut être ré-écrit en terme du flux :

$$q = \frac{8K_s \cdot h \cdot (d + \frac{h}{2})}{E^2} = \frac{8Ks \cdot h \cdot d}{E^2} + \frac{4Ks \cdot h^2}{E^2} \tag{5.10}$$

Dans cette équation, le premier terme de droite correspond au flux en dessous du niveau des drains, et le deuxième terme de droite au flux au-dessus du niveau des drains. L'équation peut être modifiée comme suit au cas où la conductivité hydraulique horizontale du sol au-dessus du niveau des drains 'Ks_1' est différente de la conductivité en dessous 'Ks_2' :

$$q = \frac{8K_{s1} \cdot h \cdot d}{E^2} + \frac{4K_{s2} \cdot h^2}{E^2} \tag{5.11}$$

- d : la profondeur équivalente de la couche imperméable sous les drains .
- h : charge maximale ;
- K_{s1} : conductivité hydraulique à saturation de la couche située sous le plan des drains ;
- K_{s2} : conductivité hydraulique à saturation de la couche située sur le plan des drains.

2. La formule de Hooghoudt et sa principe générale : c'est fréquemment utilisée pour le calcul du drainage en régime permanent, où il y a une fiabilité en régime climatique tempéré (pluies généralement de faible intensité étalées sur de longues périodes).

L'intérêt de l'analogie de Hooghoudt est de remplacer le cas réel complexe par un cas équivalent ; pour éviter d'avoir à prendre en compte la composante radiale de l'écoulement vers un drain ne reposant pas sur le substratum étanche, Hooghoudt (1940) a proposé de remplacer le réseau de drains par un réseau supposé équivalent de fossés reposant directement sur un substratum étanche fictif, ce substratum se trouve à une profondeur 'd' en-dessous du plan des drains, dénommée profondeur équivalente (Figure5.5), tel que, dans les deux cas :

- Le débit évacué soit le même ;
- La charge maximale 'h' soit identique ;
- L'écartement E entre les ouvrages soit le même.

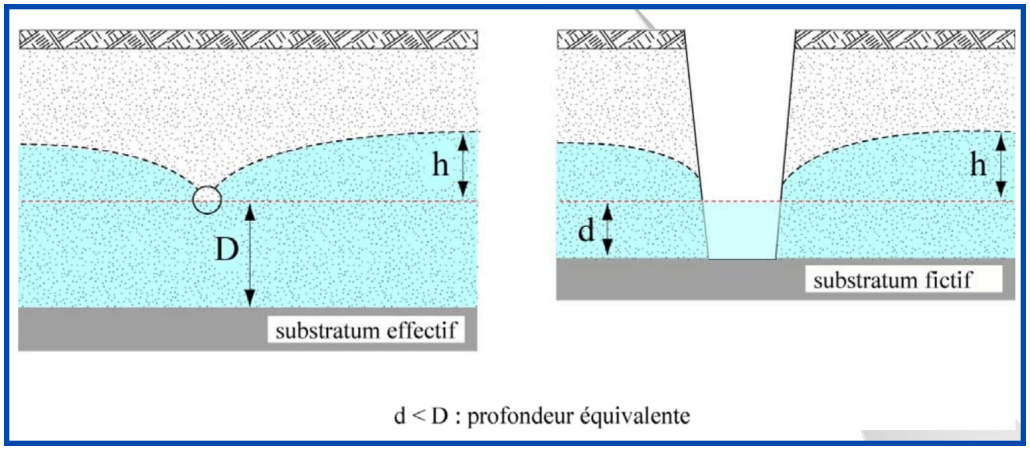


FIGURE 5.5 – Analogie de Hooghoudt [10]

3. Calcul de l'écartement E : d'après l'équation (5.11) :

$$E^2 = \frac{8K_{s1}.h.d}{q_c} + \frac{4K_{s2}.h^2}{q_c} \tag{5.12}$$

Si la valeur de la charge maximale est trop petite(h <<), ou lorsque K_{s1} >> K_{s2}, la partie de l'écoulement au-dessus de la profondeur d'installation des drains peut être négligée, la formule de Hooghoudt devient :

$$E^2 = \frac{8K_{s1} \cdot h \cdot d}{q_c} \tag{5.13}$$

4. La procédure : le calcul de l'écartement des drains selon la méthode de Hooghoudt nécessite le passage par les étapes suivantes :

1. Définir du régime d'alimentation en eau (régime de projet q), et de la profondeur minimale de la nappe 'H' ;

2. Définir de la profondeur d'installation des drains 'W' sur base de critères de terrain, alors calculer de h où : $h = W - H$;

3. Déterminer de la conductivité hydraulique K_s (ou K_{s1} et K_{s2}), et de la profondeur de la couche imperméable 'D' ;

4. Choisir du type de drain (tuyau ou fossé), et calculer du périmètre mouillé ;

5. Calculer de l'écartement entre les drains selon l'équation (5.12) ou (5.13), ces deux équations ne peuvent pas être résolues directement pour l'écartement E étant donné que d = f(E), donc il faut procéder par itérations successives ou en utilisant des abaques existantes.

b. Ecoulement en régime transitoire

Première cas : drains posés sur une couche imperméable

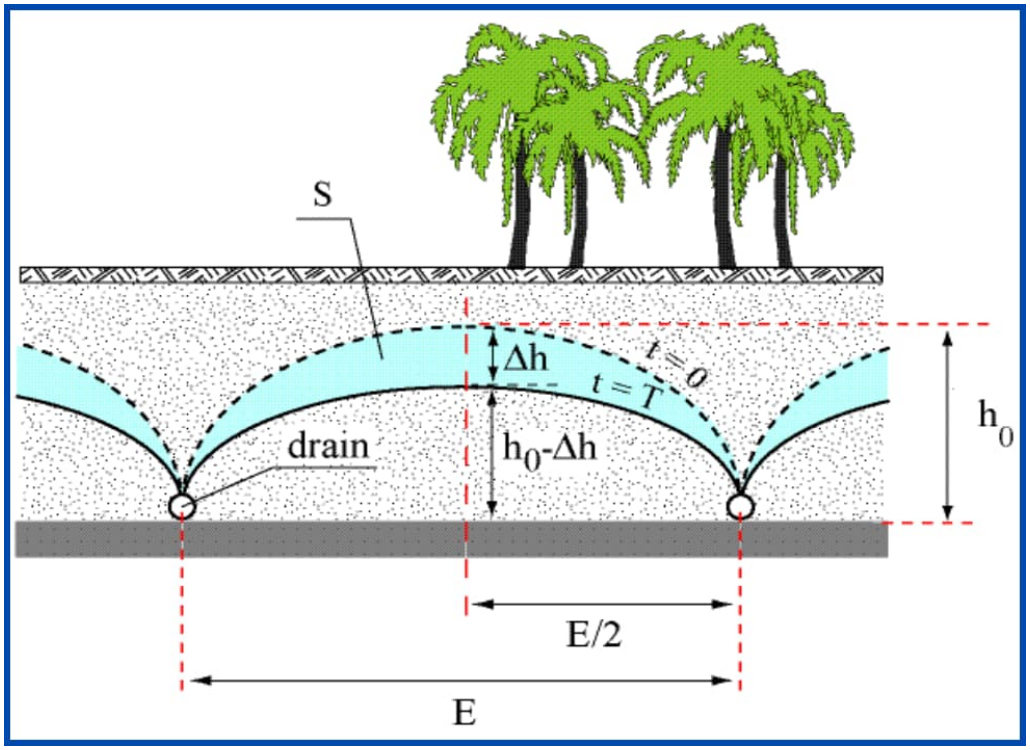


FIGURE 5.6 – Drains posés sur une couche imperméable en phase de tarissement [10]

1. Débit q_y évacué par m de longueur de drain :

$$q_y(t) = \frac{4K_s.h(t)^2}{E} \tag{5.14}$$

2. Calcul de l'écartement E :

$$E^2 = \frac{16K_s.t}{\mu\pi} \times \frac{h.h_0}{h_0 - h} \tag{5.15}$$

Deuxième cas : drains situés au-dessus de la couche imperméable (Formule de Glover-Dumm)

En pratique, le niveau de la nappe fluctue en permanence en fonction du régime d'apport d'eau par les pluies ou les eaux d'irrigation. Un certain nombre de modèles ont donc été développés pour prendre en compte le régime transitoire des pluies et les fluctuations de la nappe ; ces modèles plus sophistiqués ne sont cependant pas toujours plus performants, car ils sont souvent moins bien validés en pratique.

1. L'équation de Glover-Dumm : elle permet de déterminer le rabattement de la nappe dans le temps après la cessation de l'irrigation. Elle est basée sur l'hypothèse selon laquelle l'écoulement vers les drains est essentiellement horizontal, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de pertes de charge radiale ($h < d << L$). Alors, correspondant à l'application de la loi de Darcy sous les conditions de Dupuit-Forchheimer, on peut écrire :

$$Q_x = K_s \cdot D_h \left(\frac{dh_x}{dx}\right) \tag{5.16}$$

- Q_x : volume d'eau s'écoulant par unité de temps à travers une section droite perpendiculaire à l'écoulement, à la position x($m^3/(s.m)$;
- D_h : puissance de l'aquifère, elle représente la section de l'écoulement par unité de largeur (m) ;
- $\frac{dh_x}{dx}$: gradient hydraulique, c'est la pente de la surface libre dans la position x.

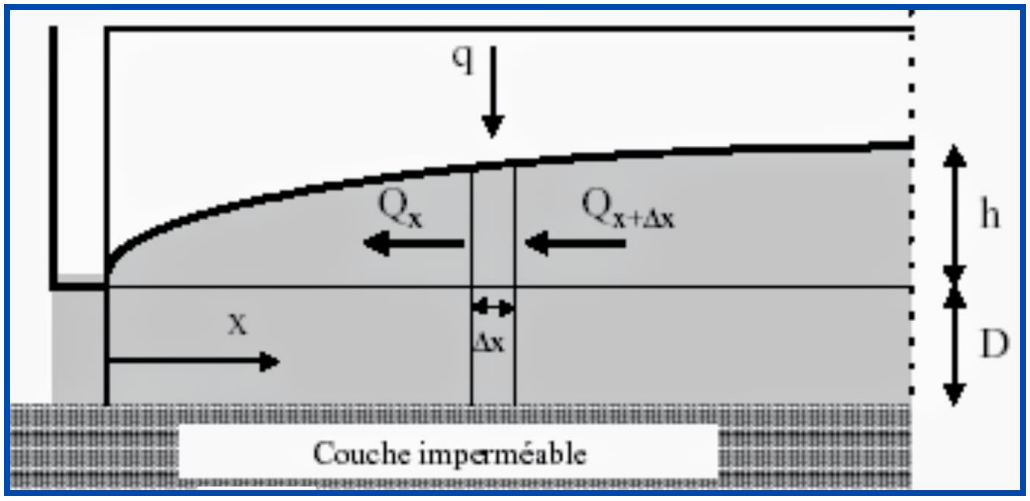


FIGURE 5.7 – Modélisation de l'écoulement horizontal d'une nappe en régime variable vers un fossé de drainage

L'expression de la conservation de la masse d'eau dans le sol signifie que toute différence entre les flux entrant et sortant dans le volume défini par une épaisseur 'Δx' se traduit par une variation de hauteur de la nappe (Figure5.7), alors pour un petit intervalle 'Δx' sous la nappe on peut écrire :

$$\mu \frac{\partial h_x}{\partial t} \Delta x = Q_{x+\Delta x} + q \cdot \Delta x - Q_x \tag{5.17}$$

Pour Δx tend vers zéro, l'équation (5.17) devient :

$$\mu \frac{\partial h_x}{\partial t} = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + q \tag{5.18}$$

Après conbénison des équations (5.16) et 5.18, on obtient :

$$\mu \frac{\partial h_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \cdot D_h \frac{\partial h_x}{\partial x} \right) + q \tag{5.19}$$

On posant que $D_h \neq f(h)$:

$$\frac{\partial h_x}{\partial t} = \frac{K_s \cdot D_h}{\mu} \times \frac{\partial^2 h_x}{\partial x^2} + \frac{q}{\mu} \tag{5.20}$$

Cette équation différentielle linéaire du 2ème degré est une des formes de l'équation de Boussinesq ; elle décrit le changement de niveau de la nappe en fonction du temps et du régime d'entrée d'eau à la surface du sol. Cette équation peut être résolue pour les conditions initiales et aux limites suivantes :

- **Les conditions initiales** :
- $q = 0$; pas d'entrée d'eau à la surface du sol ;
- t=0, et $\forall x : h_x = h_0$; nappe horizontale, initialement à une hauteur h_0 au-dessus des fossés.
- **Les conditions limites** :
- $h = 0$, $x = 0$ et $t > 0$; rabattement instantané de la nappe au niveau des fossés
- $h = 0$, $x = L$ et $t > 0$.

La solution pour ces conditions initiales et aux limites est :

$$h_t = 1.16 \cdot h_0 \cdot e^{(-\alpha t)} \tag{5.21}$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 K_s \cdot D}{\mu \cdot E^2} \approx \frac{10 \cdot K_s \cdot D}{\mu \cdot E^2} \tag{5.22}$$

2. Calcul de l'écartement 'E' : le remplacement de la profondeur 'D' par la profondeur équivalente 'd' dans l'équation (5.21) permet de prendre en compte les pertes de charges radiales dans le cas d'un drainage par drains souterrains, donc rend la formule applicable au cas du drainage par drains souterrains aussi bien que par fossé.

Les équations (5.21) et (5.22) peuvent être combinées pour permettre la détermination de l'écartement 'E' en fonction des caractéristiques du milieu et de la hauteur d'eau initiale :

$$E^2 = \frac{10 \cdot K_s \cdot d \cdot t}{\mu} \left(\ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_t} \right) \right)^{-1} \tag{5.23}$$

L'équation(5.23) doit être résolue par itérations successives dans la mesure où $d = f(E)$, elle s'applique particulièrement aux systèmes de drainage en zone aride destinés à l'évacuation des excès d'eau en système irrigué, dans ces situations, la nappe remonte suite à l'apport d'eau d'irrigation.

3. Le facteur de réaction 'α' : c'est une mesure de l'intensité avec laquelle le sol répond à une variation de l'excédant de recharge varie de :

- 0.1 à 0.3 j^{-1}, pour des sols à réponse lente (faible valeur de K_sůD , grand écartement des drains, porosité drainable élevée) ;
- 2 à 5 j^{-1} pour des sols à réponse rapide (valeur élevée de K_sůD , faible écartement des drains, porosité drainable faible).

5.4 Le dimensionnement du réseau de drainage pour lutter contre la salinisation

5.4.1 Calcul de l'écartement entre les drains

Le régime d'apport dans une zone saharienne comme M'ziraa est effectivement variable, à cause des précipitations qui sont rares (sous forme d'averses) et l'évaporation intense, alors, d'après la formule (5.23), on a :

$$E = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot K_s \cdot d \cdot t}{\mu} \left(\ln \left(1.16 \frac{h_0}{h_t} \right) \right)^{-1}} \tag{5.24}$$

- D'après les résultats des analyses physico-chimiques du sol correspondant aux profils 3, 6 et 10, les trois horizons à plus de 100/110 cm présentent des perméabilités différentes :

Profil |3| : $K_s \approx 45 mm/h$ (limon sablonneux, densité 1.23).

Profil |6| : $K_s \approx 25 mm/h$ (sable limoneux, 50 % de cailloux, densité 1.47).

Profil |10| : $K_s \approx 40 mm/h$ (limon sablonneux, densité 1.21).

On choisit la valeur la plus basse pour garantir que le réseau de drainage fonctionnera partout, même si le sol est plus dense (profil 6). Alors, on prend : $K_s = 25 \quad mm/h \approx 0.6 \quad m/j$

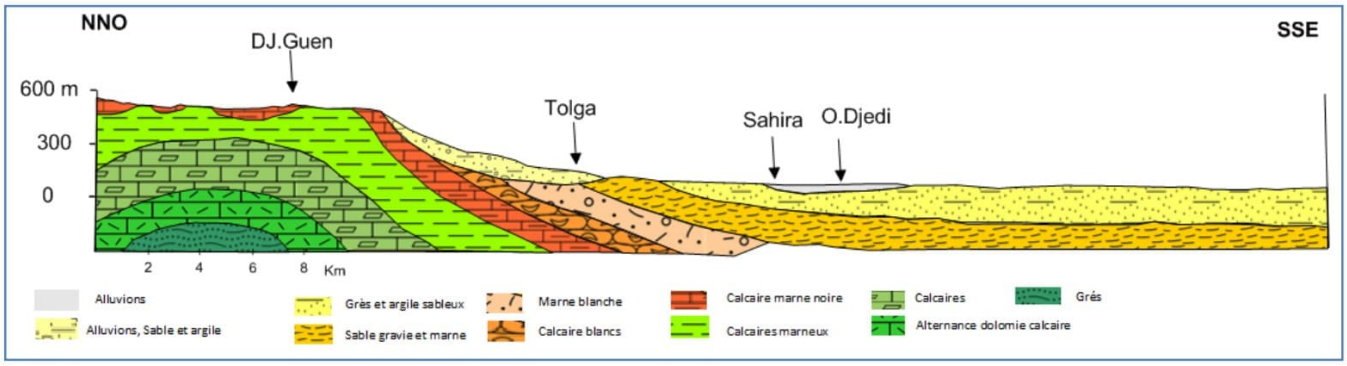


FIGURE 5.8 – Coupe géologique synthétique de la wilaya de Biskra [8]

• La légende indique majoritairement des "Alluvions, Sable et Argile" ainsi que des "Grès et argile sableux" en surface, sous ces alluvions, on retrouve des couches de Marnes (Marno-gypseuses ou blanches). La marne est une roche sédimentaire contenant beaucoup d'argile, elle est donc très peu perméable. Par conséquent, la profondeur du plancher imperméable située à 5 mètres de la surface, alors :$D = 5 - 2.5 = 2.5 \quad m$

• Pour un sol sableux/limoneux (SL/LS), la porosité drainable μ est généralement compris entre 5 à 10 %, on prend : $\mu = 0.08$.

• Juste après l'irrigation, si le drain est à 2,5 m et que la nappe remonte à 1,0 m de la surface, alors l'hauteur initiale de la nappe h_0 est égale à 1.5 m.

• On veut que la nappe redescende, par exemple, à 2.0 m de la surface pour limiter la salinisation, donc l'hauteur finale après le temps 'h_t' est égale à 0.5 m.

• Pour éviter la resalinisation, on vise souvent un rabattement en t = 10 jours.

On a : $\ln\left(1.16 \times \frac{1.5}{0.5}\right) = \ln(3.48) \approx 1.247$

Alors :$E = \pi \times \sqrt{\frac{0.6 \times d \times 10}{0{,}08 \times 1{,}247}} = \pi \times \sqrt{\frac{6d}{0.010}}$

Le tableau 10 (Voir l'annexe) permet de corriger l'épaisseur réelle D pour tenir compte de la convergence des lignes de courant vers le drain. On suppose que : E = 20 m, et à l'intersection de E=20 et D=2,50, la valeur est 1.55, alors :

$E_1 = \pi \times \sqrt{\frac{6 \times 1.55}{0.10}} \implies E_1 \approx 30 \quad m.$

À l'intersection de E=30 et D=2,50, la valeur est 1.40, alors :

$E_2 = \pi \times \sqrt{\frac{6 \times 1.4}{0.10}} \implies E_2 \approx 29 \quad m$

Alors, par itération, la valeur d'écartement ajustée est : $E = 30 \quad m$

5.4.2 Profondeur des drains

Dans les zones arides, où la nappe phreatique est près de la surface du sol et la teneur en sales est élevée les tuyaun seront placés à 2,5m de profondeur [13].

5.4.3 La pente d'installation

Pour tracer le trajet optimal des drains latéraux et le collecteur principal vers l'exutoire, il doit suivre la logique de la gravité à l'aide des données topographiques. Pour obtenir la pente en pourcentage, on utilise la formule suivante :

$$S = \frac{\Delta H}{D} \times 100 \tag{5.25}$$

- ΔH : dénivelé, c'est la différence d'altitude (m) ;
- D : distance horizontale, elle est mesurée au sol à l'aide de la barre d'échelle (m).

Voici la carte topographique de la zone 2 créée par Global Mapper :

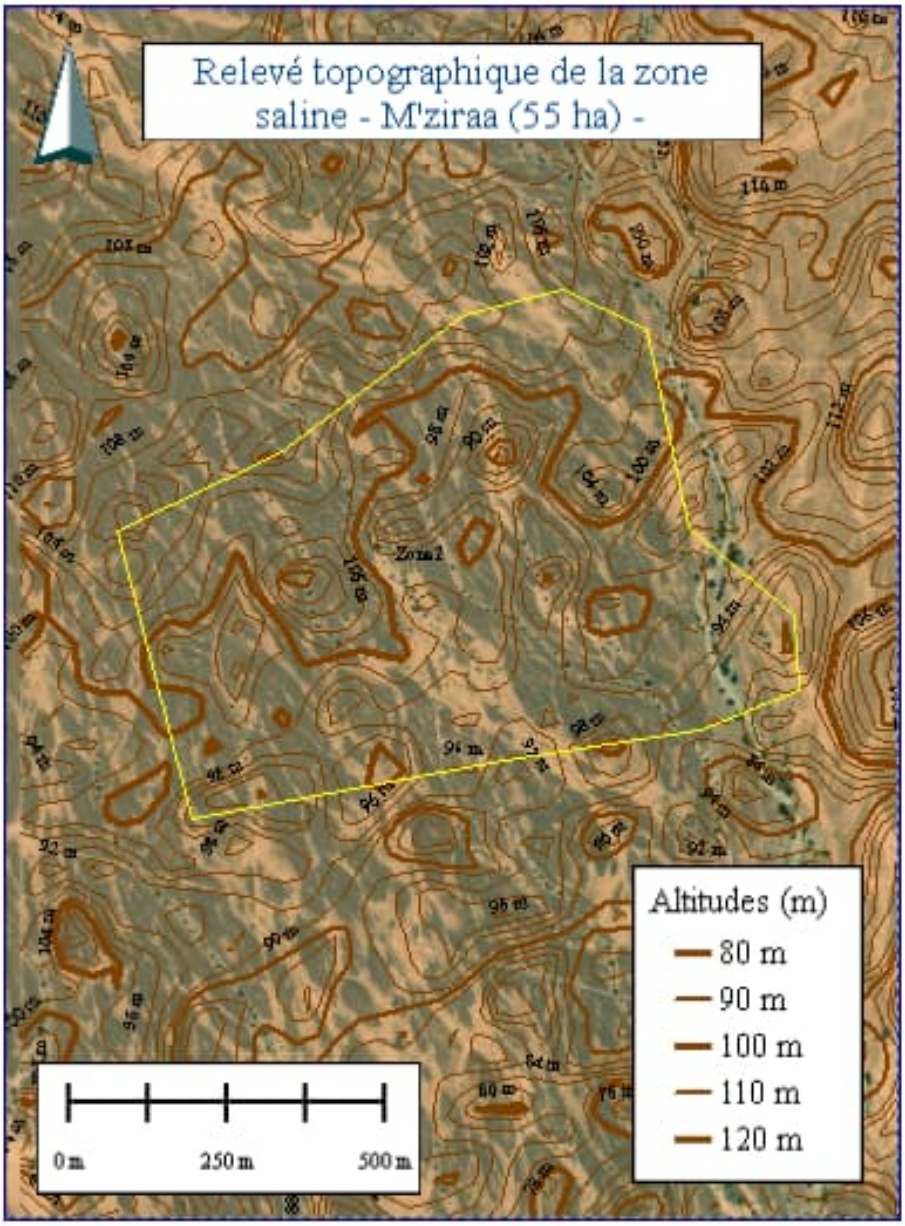


FIGURE 5.9 – Relief et topographie - Secteur M'ziraa (55 hectares).

Conditions :

1. Pour éviter une stagnation ou le besoin d'une station de pompage, le fond de la canal exutoire doit impérativement se situer plus bas que le point de sortie de la collecteur principal.

2. Le niveau de l'eau dans la canal exutoire doit être inférieur à 77,5 m pour que l'eau s'écoule naturellement, sinon, l'eau du canal remontera dans les drains !

Vérifications :

1. Le fond de la canal exutoire à la sortie du canal correspond au 101.80 m, alors que l'altutide du point de sortie de la collecteur principal est 105.25 m, donc la première condition est validée.

2. D'une part, le drain est à -2,5 m sous la surface au point le plus bas (105.25 m), l'eau sortira à une altitude réelle de 102.75 m, d'autre part, le niveau de l'eau dans la canal exutoire est 102.64 m, donc la deuxième condition est validée.

◇ Les résultats obtenus à l'aide de Global Mapper sont présentés dans le tableau suivant :

TABLE 5.1: Profil longitudinal du Canal Principal - Échantillonnage tous les 30 m

Index	Coordonnées DMS	Coordonnée X	Coordonnée Y	Élévation Z(m)	Inclinaison(°)	Longueur du segment(m)	Longueur cumulée(m)
1	208°01' 14.298"	259515.313	3853820.680	112.9694	-0.32	30	—
2	208° 01' 14.013"	259500.525	3853794.567	112.80000	-0.67	30	30
3	208° 01' 13.168"	259485.738	3853768.453	112.4500	-0.48	30	60
4	208° 01' 13.445"	259470.951	3853742.340	112.2000	-0.38	30	90
5	208° 01' 13.168"	259456.164	3853716.227	112.0000	-0.57	30	120
6	208° 01' 12.876"	259441.377	3853690.114	111.7000	-0.38	30	150
7	208° 01' 12.591"	259426.590	3853664.000	111.5000	-0.48	30	180
8	208°01' 12.307"	259411.803	3853637.887	111.2508	-0.48	30	210
9	208° 01' 12.022"	259397.016	3853611.774	111.000	-0.29	30	240
10	208° 01' 11.738"	259382.228	3853585.660	110.8500	-0.67	30	270
11	208° 01' 11.453"	259367.441	3853559.547	110.5000	-0.38	30	300
12	208° 01' 11.169"	259352.654	3853533.434	110.3000	-0.29	30	330
13	208° 01' 10.885"	259337.867	3853507.320	110.1500	-0.29	30	360
14	208° 01' 10.600"	259323.080	3853481.207	110.0000	-0.38	30	390
15	208° 01' 10.316"	259308.293	3853455.094	109.8000	-0.57	30	420
16	208° 01' 10.031"	259293.506	3853428.980	109.5000	-0.38	30	450
17	208° 01' 09.747"	259278.718	3853402.867	109.3000	-0.35	30	480
18	208° 01' 09.462"	259263.931	3853376.754	109.1150	-0.22	30	510
19	208° 01' 09.178"	259249.144	3853350.640	109.0000	-0.38	30	540
20	208° 01' 08.894"	259234.357	3853324.527	108.8000	-0.38	30	570
21	208° 01' 08.609"	259219.570	3853298.414	108.6000	-0.38	30	600
22	208° 01' 08.325"	259204.783	3853272.300	108.4000	-0.54	30	630
23	208° 01' 08.041"	259189.996	3853246.187	108.1150	-0.22	30	660
24	208° 01' 07.756"	259175.208	3853220.074	108.000	-0.19	30	690
25	208° 01' 07.472"	259160.421	3853193.960	107.9000	-0.38	30	720
26	208° 01' 07.188"	259145.634	3853167.847	107.7000	-0.38	30	750
27	208° 01' 06.903"	259130.847	3853141.734	107.5000	-0.95	30	780
28	208° 01' 06.619"	259116.060	3853115.620	107.0000	-0.38	30	810
29	208° 01' 06,335"	259101.273	3853089.507	106.8000	-0.32	30	840
30	208° 01' 06.050"	259086.485	3853063.394	106.6316	-0.33	30	870

Suite							
31	208° 01' 05.766"	259071.698	3853037.280	106.4600	-0.40	30	900
32	208° 01' 05.482"	259056.911	3853011.167	106.2500	-0.48	30	930
33	208° 01' 05.197"	259042.124	3852985.053	106.000	-1.44	30	960
34	–	259027.337	3852958.940	105.2481	0.45	30	990

D'après la formule (5.25) :
$S = \frac{112{,}9694 - 105{,}2481}{856.25} \times 100 \implies S = 0,9$
Cette pente de $0,9 \quad cm/m$ est très approprié pour assurer l'évacuation des eaux vers l'exutoire.

Les drains latéraux : Ce sont eux qui seront espacés de 30 m et enterrés à 2,5 m. Ils doivent être installés parallèlement aux courbes de niveau (ou avec une légère pente) pour intercepter l'eau de la nappe. On utilise le plan parcellaire de la zone saline pour aligner les drains sur les limites de ces parcelles.

Pour garantir le transport des sels sans dépôt de sédiments, il faut assurer que la pente des drains soit d'au moins $0,1\%$(1 mm par mètre).

5.4.4 Débit à évacuer par le drain

$$Q_d = \frac{q \times S}{0.5} = \frac{q \times L \times E}{0.5} \tag{5.26}$$

- S : surface drainée par un drain ;
- L : longueur du drain ;
- E : Ecartement entre les drains.
- 50% : facteur de correction dans le cas de sédimentation. Alors : $Q_d = 0.59 \times 10^{-3} \times 275 \times 30 \implies Q_d = 9.74 \quad m^3/j$

5.4.5 Dimensionnement des drains

Pour le régime non uniforme avec l'installation des drains perforés annulés, on prend la formule suivante :

$$Q_{drain} = 38 \times d^{2.67} \times i^{0.5} \tag{5.27}$$

Alors :$Q_{drain} = 38 \times d^{2.67} \times 0.001^{0.5} \implies d = 31 \quad mm$
On prend : d=63 mm

5.4.6 Dimensionnement des collecteurs

$$Q_{collecteur} = \frac{50 \times d^{2.71} \times i^{0.57}}{0.75} \tag{5.28}$$

Alors :$Q_{collecteur} = \frac{50 \times 0.11^{2.71} \times 1.08^{0.57}}{0.75} \implies Q_{collecteur} = 17.58 \times 10^{-2} \quad m^3/j$

5.5 Efficacité du drainage

Une étude menée à Ohio en 1996 a identifié les cinq facteurs qui ont le plus impact sur les rendements [1] :

1. Le drainage ;

2. les variétés cultivées et la résistance aux maladies ;

3. les problèmes liés aux insectes et aux mauvaises herbes ;

4. la rotation des cultures ;

5. les pratiques culturales.

Solon l'étude, le système de drainage doit être plus efficace ; cet efficacité réside dans le respect des critères de la conception et de réalisation du réseau, son rôle et ses avantages qui peuvent apporter à lagriculture. L'efficacité du système de drainage comporte trois situations rencontrées :

5.5.1 Situation 1 : Mauvais rendement dans l'ensemble du champ et peu ou pas de variation de rendement sur et entre les drains

Il est possible, dans ce cas, que tout le système de drainage ne fonctionne pas. Il y a d'autres causes qui sont toutefois possibles et doivent également être explorées avant d'évaluer le drainage :

- Des séries de sol de faible potentiel ;
- Des problèmes agronomiques ;
- Des problèmes de compaction, ou une présence de couche de sol naturellement imperméable, etc.

Il est recommandé d'observer le débit à la sortie du drain, de faire le suivi de la nappe, de faire des profils de sol et de vérifier l'état du réseau de drainage.

5.5.2 Situation 2 : Mauvais rendement dans une petite partie du champ

Un problème de drainage souterrain peut être à l'origine d'un tel problème ; dans ce cas, il y aura présence d'une nappe d'eau élevée au-dessus du drain indiquant une mauvaise évacuation de l'eau dans le drain, et l'observation du système à cet endroit généralement permettra d'identifier le problème. Dans la plupart des cas, surtout lorsque le problème est lié aux drains, il est ponctuel et facile à corriger cela.

5.5.3 Situation 3 : Mauvais rendement dans une grande partie du champ et rendement meilleur au-dessus des drains qu'entre les drains

On voit dans ce cas une différence marquée du développement de la culture entre le dessus du drain et l'entre-drain (Figure5.10), et il est fort probable que le système de drainage souterrain limite le rendement des cultures. Dans cette situation, Il est recommandé de faire le suivi de la nappe, d'effectuer des profils de sol et d'observer le réseau.

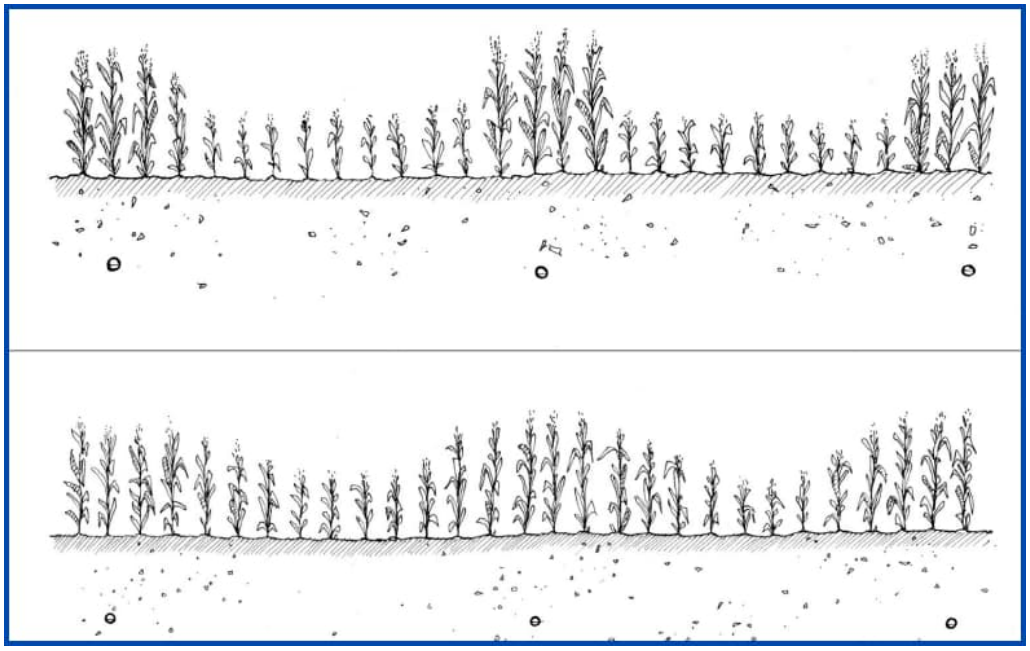


FIGURE 5.10 – Exemple de l'effet d'un drain sur le développement des cultures [1]

5.6 Diagnostic de l'efficacité du système de drainage souterrain

La méthode suggérée pour réaliser le diagnostic de l'efficacité du système de drainage comporte quatre étapes :

5.6.1 Observation du débit à la sortie du drain

Tôt au printemps ou après une pluie, il faut vérifier l'état de la sortie de drain et le débit d'eau à la sortie ; là où la nappe est haute, le débit à la sortie du drain devrait être important (1/2 du diamètre ou plus si la pente est faible). Voici quelques autres observations importantes qui doivent être faites :

- L'absence de grille peut permettre l'entrée de rongeurs dans le système ;
- La présence d'une coloration orangée indique la présence de fer dans l'eau de drainage, ce qui rend possible le colmatage des pertuis, du matériel filtrant ou la formation de bouchons d'ocre ferreux dans le drain ;
- Un écoulement d'eau sur le pourtour de la sortie peut indiquer une restriction de l'eau près de la sortie.

5.6.2 Suivi de la nappe

La deuxième étape du diagnostic consiste à faire le suivi de la nappe (Voir l'annexe figure 19). Ce suivi se déroule sur une bonne partie de la saison de culture, où il permet de valider le suivant :

D'une part, si le rabattement de la nappe répond aux attentes du producteur agricole, et si la hauteur de la nappe nuit au rendement des cultures.

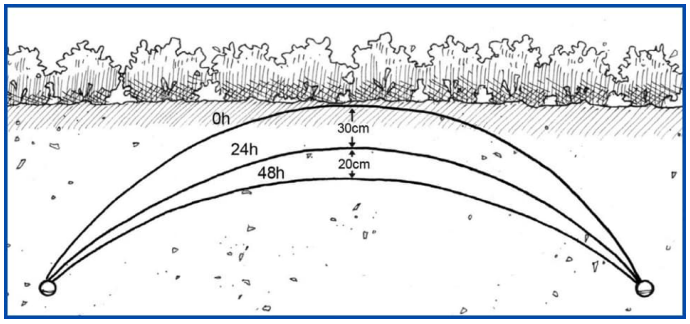


FIGURE 5.11 – Courbes d'une nappe qui se rabat rapidement après qu'une pluie ait fait remonter cette nape. Les trois courbes représentent la position de la nappe à la fin de sa remontée lorsque celle-ci atteint la surface, 24 heures et 48 heures plus tard [1]

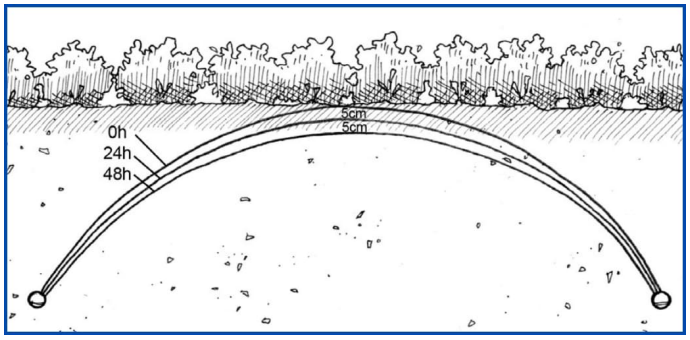


FIGURE 5.12 – Courbes d'une nappe qui se rabat plus lentement pour une même situation initiale [1]

D'autre part, la forme de la nappe, on distingue quatre types différents :

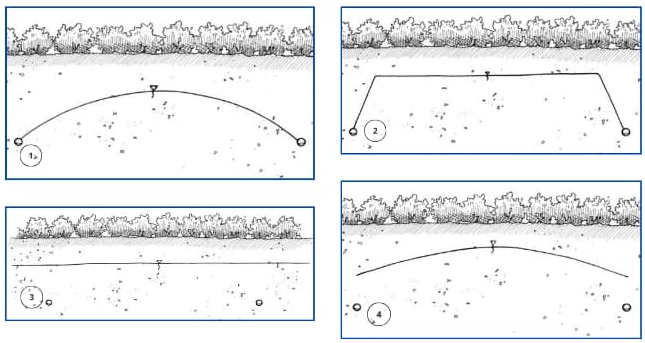


FIGURE 5.13 – Lignes de dépression de la nappe phréatique entre deux drains [1]

1. Nappe normal : l'eau descend normalement dans le profil sous l'effet des drains souterrains.
2. Nappe basse au-dessus des drains, haute et horizontale entre les drains : l'eau ne descend pas selon une forme parabolique normale ; où seules les bandes au-dessus et très près des drains présentent une nappe basse sauf sur les drains.
3. Nappe horizontale et haute sur toute la largeur : l'eau ne descend pas dans le profil, alors que les drains n'ont aucun effet sur la nappe, et le sol semble limiter le mouvement de l'eau vers les drains.

4. Nappe de forme normale mais ne descend pas jusqu'au drain : l'eau descend normalement mais pas suffisamment au-dessus des drains.

5.6.3 Observation du profil de sol

Afin de s'assurer que le sol n'est pas l'élément limitant l'évacuation et l'infiltration d'eau, il est suggéré pendant cette étape du diagnostic de faire au moins de deux profils de sol dont un entre les drains et un au-dessus d'un drain. En effet, il existe deux principales difficultés associés aux sols :

- Le type de sol limite le déplacement de l'eau vers le drain (sol naturellement massif ou mal structuré) ;
- La compaction limite le déplacement de l'eau vers le drain, car le sol est compacté par le poids des machines et les passages répétés dans un sol trop humide.

5.6.4 Vérification du système de drainage

La quatrième étape est la vérification du système de drainage, ainsi que son pourtour et une fois ces observations terminées, il sera plus facile de faire un constat des problèmes rencontrés. Dans tous les cas, si l'eau entre difficilement dans les drains, la nappe restera juste au-dessus du drain et une zone très humide autour du drain sera visible. Si une nappe est présente, le sens de l'écoulement de l'eau dans les drains doit être confirmé et noté ;

5.7 Conclusion

En somme, il apparaît que le réseau de drainage se compose de 32 drains, installés à une profondeur de 2.5 mètres, avec un écartement de 30 mètres, ces drains latéraux recueillent l'eau des parcelles de la zone saline, et la dirigent vers un canal principal qui mesure 990 mètres de long avec une pente de 0.9 cm/m, ce canal achemine l'eau directement vers l'exutoire, qui est le canal de protection conçu dans la quatrième chapitre, ce canal qui reçoit les eaux drainées par le drain principal rejette ces eaux chargées en sels vers l'émissair.

Les erreurs coûteuses peuvent être évitées en améliorant la disposition des drains. Ce faisant, on augmente de l'efficacité du système.

Chapitre 6

Organisation du chantier, et Sécurité au travail



6.1 Introduction

Le drainage agricole est un investissement conséquent. C'est une opération complexe sur les plans techniques, économiques et environnementaux, justifiant d'une réalisation raisonnée et adaptée à la situation à traiter [3]. Ce chapitre montre que l'organisation du chantier, que ce soit spatialement ou temporellement, permet d'assurer la sécurité et l'optimisation de l'exécution des travaux.

6.2 Présentation d'un chantier de drainage

Le drainage agricole nécessite des engins et du matériel spécifiques, une organisation et un savoir-faire particuliers. L'équipe de chantier est généralement composée de 3 à 4 personnes, formées aux différents postes de travail [3].

6.2.1 Le matériel

a. Drain perforé

Pour les drains latéraux, on utilise généralement des diamètres compris entre 40 et 65 mm, alors que les diamètres supérieurs peuvent être utilisés pour les collecteurs.

L'entrée d'eau dans les tuyaux en plastique se fait par de petites perforations rectangulaires de 0.6 à 2 mm de largeur placées à intervalles réguliers le long du tube, où la surface totale de ces perforations doit être au minimum de 800 mm² par mètre de tuyau. Lors de l'écoulement vers et au travers des ouvertures dans les drains, il se produit une perte de charge ; pour un même débit d'entrée :

Les pertes de charge seront d'autant plus faibles que la surface des ouvertures par unité de longueur est importante ; plus il y a de perforations, plus l'eau peut entrer facilement dans le drain, cela réduit la résistance à l'entrée, donc diminue les pertes de charge locales au niveau des perforations, mais attention, si les perforations sont trop nombreuses ou mal réparties, elles peuvent créer des zones de

turbulence à l'intérieur du drain. Cela peut augmenter les pertes de charge linéaires dans le sens de l'écoulement.

Ceci explique la grande résistance que présentent les drains en terre cuite et en ciment qui provient de l'écartement important entre les joints où l'eau peut pénétrer dans le drain. D'autre part, la très faible résistance des drains rugueux par rapport aux drains lisses qui provient de la plus grande superficie perforée des drains rugueux. A cet effet pour les écoulements en milieu saturé, on utilise une équation comparable à la loi de Darcy pour caractériser la résistanc α (adimensionnelle) des tuyaux à l'entrée d'eau :

$$Q = K.\frac{dh}{\alpha} \tag{6.1}$$

- Q : débit d'entrée d'eau dans le tuyau $(m^3.m^{-1}.j^{-1})$;
- K : conductivité hydraulique du matériau entourant le tuyau $(m.j^{-1})$;
- he : perte de charge à l'entrée (m).

TABLE 6.1 – Les valeurs typiques de α pour différents matériaux

Matériau	**Résistance (α)**
terre cuite et ciment	0.4 2
plastique lisse	0.4 0.6
plastique rugueux	0.05 0.1

□ **Source : Cours du drainage.**

b. Accessoires de raccordement

Des accessoires normalisés permettent les raccordements entre les différents tronçons du réseau. Ils sont conçus pour ne pas faire obstacle à l'écoulement de l'eau [3]. Il est préférable que les accords soient souvent réalisés dans les endroits présentant de plus grands risques de colmatage (pente faible), ou après de grandes longueurs de drains (> 250 m).

c. Regard de visite

Un regard regroupe plusieurs collecteurs du réseau de drainage et facilite son entretien [3].

d. Collecteur

Le collecteur, de diamètre variable, perforé ou non, récupère l'eau infiltrée dans les drains pour l'évacuer vers l'exutoire (point de sortie) [3].

e. Bouche de décharge

En béton ou en matières plastiques, habituellement équipée d'une grille ou d'un clapet articulés, la bouche de décharge est placée à la sortie du collecteur [3].

f. Laser rotatif et Émetteur laser sur trépied

Le principe du contrôle de profondeur repose sur la mise en place d'un niveau de référence au-dessus du sol ayant la pente désirée, pour maintenir une distance constante entre le niveau de référence et le drain ou le fond du fossé. La méthode la plus simple consiste à établir un niveau de référence

pour chaque drain par une suite de piquets tels que le sommet des piquets suive une pente constante. Lors de l'installation mécanique, l'opérateur veillera à maintenir un repère au niveau du bras dans l'alignement du niveau de référence.

Actuellement, le contrôle de profondeur se fait régulièrement de manière automatisée.



FIGURE 6.1 – Système de contrôle de profondeur par laser rotatif

□ **Source : Batiweb**

6.2.2 Les engins de chantier des terrassements

Dans lesquelles le réseau de drainage sera mis en place, le choix du matériel utilisé à cette étape importante dépend du coût en premier lieu, de la disponibilité et des conditions techniques. Les principaux avantages et inconvénients des engins sont détaillés ci-dessous :

TABLE 6.2 – Principales caractéristiques des machines de drainage [5]

Type	P requise (kW)	h_{max}(m)	L tranchées (cm)	V de travail(km/h)
Backacter	30-50	jusqu'à 4	20-60	0.2
Continuous crawler léger	60-90	1.5-2	20-30	0.5-1
Continous crawler medium	100	2.5	20-45	1-2
Continous crawler lourd	150	3-3.5	20-45	jusqu'à 3
Trenchless, winched	50-80	1.2-1.7	–	1.7-2
Trenchless, crawler	100-150	1.6-2.0	–	jusqu'à 5

a. Rétracaveuse "Backacter"

La rétrocaveuse (pelleteuse-chargeuse) est un engin polyvalent de chantier des travaux de drainage ; cela s'explique sa capacité à la fois de creuser (avec la pelle arrière), et de déplacer des matériaux (avec le godet avant).r



FIGURE 6.2 – Rétracaveuse

□ **Source : Alibaba**

b. Trancheuse de roches "continuous crawler"

C'est un engin de chantier spécialisé dont la fonction principale est de creuser des tranchées dans des sols très durs, notamment rocheux, là où les méthodes classiques comme les pelleteuses ou les excavatrices sont moins efficaces.



FIGURE 6.3 – Installation d'un système de drainage avec une trancheuse spécialisée

Sources : 1- Vermeer Corporation. 2- Baumalight

c. Machine sans tranchées "trenchless"

Les travaux sans tranchée sont des techniques modernes de construction qui consistent à réaliser des travaux souterrains sans ouverture de tranchées.



FIGURE 6.4 – Machine de forage sans tranchée (Trenchless)

□ **Source : Made-in-China.com** Ces techniques de travaux sont variées, et peuvent inclure des méthodes comme :

Le forage dirigé (directionnel) : une technique de construction souterraine qui permet d'insérer des canalisations sans excaver une tranchée à la surface.

Le forage horizontal : une technique qui permet de creuser des tunnels horizontaux pour l'installation de canalisations et de conduites, pour des projets de courte distance.

Le microtunnelage : une technique de forage pour creuser des galeries souterraines de petit diamètre, pour les projets de faible profondeur et de courte distance.

La réhabilitation de réseaux enterrés par chemisage : une technique qui consiste à insérer une gaine en résine à l'intérieur des canalisations existantes au niveau des réseaux endommagés pour les renforcer, et prolonger leur durée de vie.

d. Les engins pour les drainages spéciaux

- **Charrue taupe**

En terrain suffisamment cohérent et humide, la technique de drainage par charrue taupe élève la perméabilité et rend le système plus efficace en matière d'évacuation des excès d'eau. Dans les sols lourds et argileux peu perméables, la charrue taupe permet de façonner et créer vers environ 60 à 80 cm dans le sol des galeries taupe (canaux moulés souterrains sans tuyaux) ; l'organe de moulage est constitué par un obus métallique (40 à 100 mm de diamètre), qui permet à l'eau de s'écouler vers des fossés ou des drains collecteurs.



FIGURE 6.5 – Charrue taupe pour terre franche et roches (à gauche), et Charrue taupe pour terre noire (à droite)

☐ **Source : Agri-Réseau • Sous soleuses**

Avant les semis, le sous-solage permet d'augmenter la conductivité hydraulique saturée du sol ; le sous-soleuse pénètre profondément avec des dents ou des lames pour aérer le sol (tous types, surtout les sols tassés ou cultivés intensivement), il brise les horizons de tassement (sous-solage fermier, profondeur vers 50 à 60 cm ou sous-solage industriel, profondeur vers 70 à 90 cm), cela dû au fait qu'il recoupe plus ou moins perpendiculairement les lignes de labour et évite la formation de ses semelles. Cela permet de remonter le sol sur une certaine profondeur, d'améliorer l'infiltration, et d'accroître ainsi son aptitude au drainage naturel.



FIGURE 6.6 – Technique du sous solage afin d'améliorer l'aération

☐ **Source : www.cucchi-ma.it**

6.2.3 Les équipements de terrassement

L'excavation latérale désigne une opération de creusement qui se fait transversalement par rapport à l'axe principal d'une structure pour élargir, connecter ou accéder à des zones spécifiques (Figure6.7).

L'excavation longitudinale est une opération de creusement qui se fait dans le sens de la longueur d'un système (comme un drain, une conduite) (Figure6.7). Elle est souvent utilisée pour installer

des tuyaux d'irrigation ou de drainage, et faciliter l'écoulement de l'eau selon une pente naturelle du terrain.

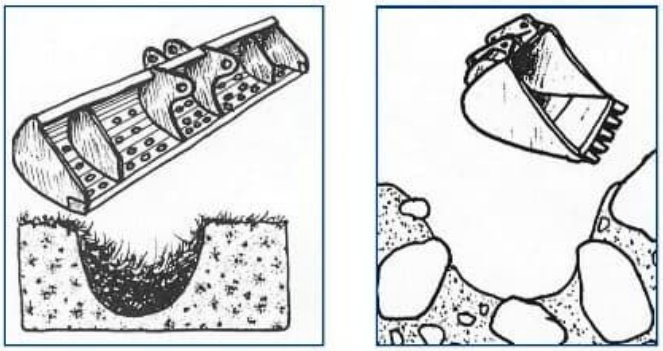


FIGURE 6.7 – Excavation latéral à l'aide d'un godet cribleur (à gauche), et Excavation longitudinale l'aide d'un godet de curage [11]

Dans le cas où le sol est saturé ou meuble, l'excavation latérale peut être plus complexe ; dans le sol instable, surtout le sol organique (humus,be tour) (Figure6.8), il faut souvent prévoir des talus ou des soutènements pour éviter les éboulements qui retardent les travaux d'excavation.

Le sol minéral (argile, sable, limon) est plus prévisible et adapté aux deux types d'excavation, surtout si bien compacté.

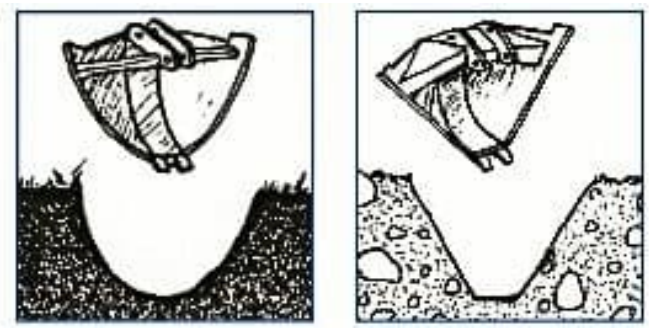


FIGURE 6.8 – Excavation longitudinale dans un sol organique (à gauche), et dans un sol minéral (à droite) [11]

6.2.4 Les postes de travail

- Le chef de chantier ou chef d'équipe ;
- Le conducteur de draineuse ;
- Le conducteur de pelle hydraulique ;
- Le raccordeur (ou brancheur) ;
- Le suiveur de draineuse.

6.3 Préparation du chantier

Cette phase de préparation est de la responsabilité du chef de chantier [1]. S'aider d'outils tels que la méthode des 5 M [3] :

- Est-ce que les matériaux sont bien commandés ?

- Est-ce que les machines adaptées sont opérationnelles ?
- Est-ce que le plan des travaux est validé ?
- Est-ce que les équipes seront disponibles, disposeront des habilitations/formations nécessaires ?
- Est-ce que le chantier présente des difficultés d'accès ?

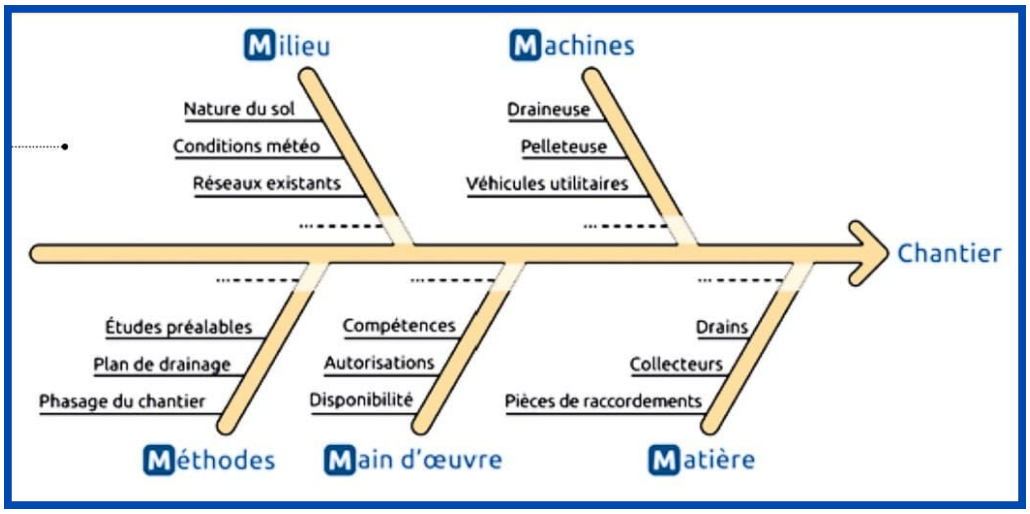


FIGURE 6.9 – La méthode des 5M [3]

Afin de préparer un chantier aux travaux d'excavation, les tâches suivantes sont à réaliser :

- Marquage des fossés avec du ruban de couleur [11], et identifier le chaînage pour guider efficacement les engins ;
- Nettoyer les passages de tranchées ;
- Planifier les emplacements de transport, prévoir également des corridors de déplacement pour la machinerie aux extrémités des fossés [11] ;
- Assurer l'approvisionnement en carburant ;
- Établissement de repères altimétriques lorsqu'on utilise un système de guidage laser [11].

6.4 Période de placement des drains

Le fait de pouvoir effectuer les travaux de drainage au champ plus rapidement au printemps et plus tard à l'automne offre une plus grande latitude et représente un avantage certaine [1] ; où la réalisation de devers travaux d'irrigation à périodes aléatoires conduit à bloquer le développement racinaire, favoriser le ruissellement et l'érosion, et pénaliser la régénération du sol et la vie biologique. La prise en compte de cette condition permet de minimiser les problèmes suivants :

- Compaction de sols en premier lieu, on distingue trois types :

1. La compaction de surface liée à la pression de gonflage et au poids des engins agricoles (moins de 20 cm de profondeur) ;

2. La semelle de labour qui est formé par le passage répété des socs de charrue toujours à la même profondeur (entre 30 et 40 cm) ;

3. La compaction profonde lié essentiellement au poids des machines (60 cm et au-delà).

- Stagnation de l'eau en surface, alors que les couches profondes compactés par pneus agricoles empêchent l'infiltration de l'eau vers le sous-sol ;
- Mauvais développement des cultures, où une disparité d'enracinement lié au arrivée des certaines parties à maturité plus tôt, ou cela lié au différence de taille des plants.

6.5 Ordonnancement des travaux

la méthode CPM (Critical Path Method) est une technique de gestion pour planifier, coordonner et suivre l'exécution d'un projet du début à la fin. Le processus pour calculer le chemin critique se déroule en 6 étapes :

1. Identifier les activités à la réalisation du projet, souvent à l'aide d'une Structure de Décomposition du Travail 'SDT'. Les principales opérations pour exécuter le réseau de drainage sont :

A. Décapage de la couche de terre ;

B. Piquetage ;

C. Exécution des tranchées et des fouilles pour les regards ;

D. Aménagement de l'enveloppe du gravierq ;

E. Construction des regards ;

F. La mise en place des drains en tranchées ;

G. Assemblage des drains ;

H. Faire les essais d'étanchéité pour les drains ;

I. Remblai des tranchées ;

J. Travaux de finition.

2. Déterminer la séquence des activités et leurs épendances.

3. Estimer la durée de chaque activité. Dans le CPM classique, on utilise une durée fixe, contrairement à la méthode PERT 'Programation Evaluation And Review Technic'.

4. Visualiser le projet sous forme de diagramme de réseau (réseau a nœuds ou réseau a flèches), on choisit la méthode de calcul 'CPM', où les tâches sont représentées par des nœuds, et les dépendances par des flèches.

5. Calculer le chemin critique, pour cela, il faut réaliser deux passages sur le diagramme de réseau :

• **Calcul allé :** calculer pour chaque tâche la date de début au plus tôt et la date de fin au plus tôt.

• **Calcul retour :** calculer pour chaque tâche la date de fin au plus tard et la date de début au plus tard, en partant de la fin du projet.

6. Calculer la marge totale, elle représente le temps qu'une tâche peut être retardée sans retarder la date de fin du projet. Les tâches sur le chemin critique ont une marge nulle, alors :

$$\begin{cases} MT = 0 \\ \sum TR_{\text{CC}} = DTP \end{cases} \tag{6.2}$$

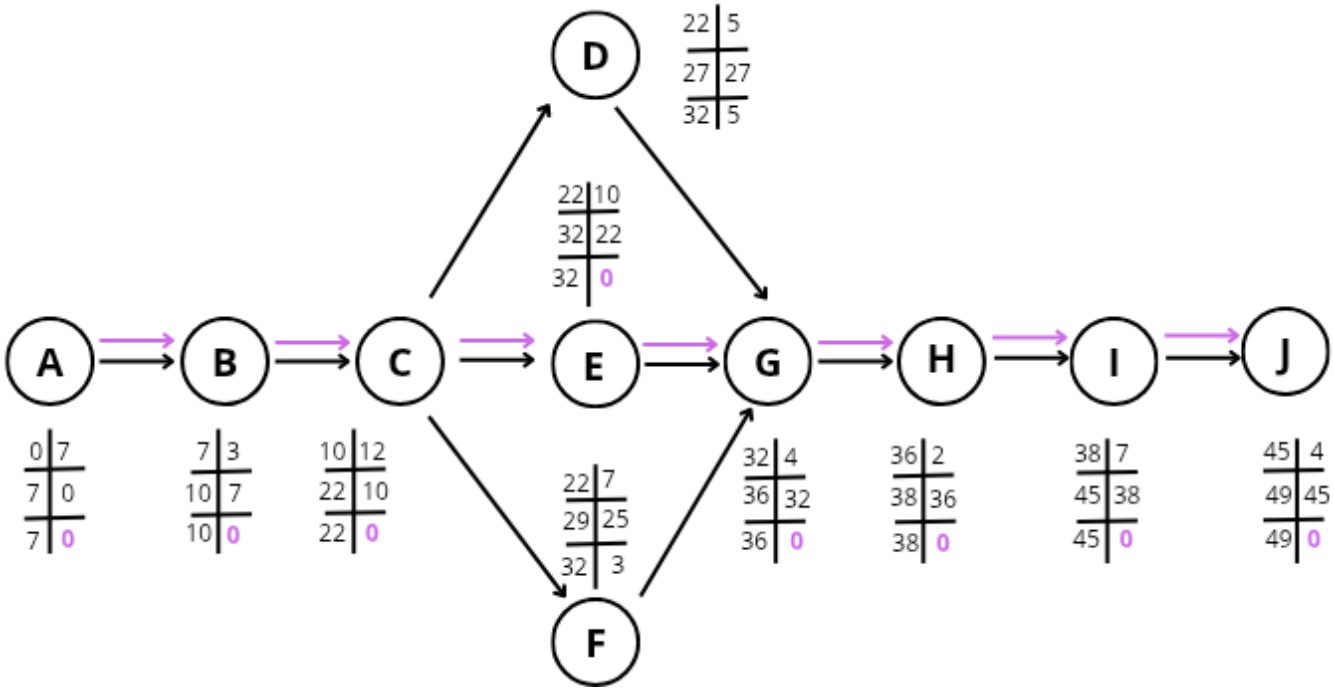
• MT : marge totale, c'est l'intervalle de temps compris entre la date de commencement au plus tôt 'DCP', et la date de commencement au plus tard 'DCPP', ou l'intervalle de temps compris entre la date de finition au plus tôt 'DFP', et la date de finition au plus tard 'DFPP' ;

• TR : temps nécessaire de réalisation ;

• CC : chemin critique, cela fait référence à lala séquence des tâches critiques dans un projet qui a la durée totale maximale du début à la fin ;

• DTP : durée totale du projet, c'est égale à la somme des temps de réalisation 'TR' des opérations se situant sur le chemin critique.

◇ Le réseau à nœuds du projet de drainage au niveau de la deuxième zone est représenté dans le schéma suivant :



Pour retrouver le chemin critique il suffit de vérifier les deux conditions (6.2), on a : $\sum TR_{\text{CC}} = 7+3+12+10+4+2+7+4 \implies DTP = 49$ jours.

6.6 Déroulement du chantier de drainage

La combinaison du creusement mécanique et du placement manuel est fréquent pour le pose de gros collecteurs(Figure**??**) ; ou lorsqume le placement manuel permet d'éviter les erreurs coûteuses, d'assurer la précision du positionnement et la sécurité durant les installations.

6.6.1 Aménagement de Brise-vents

Les brises-vent sont des trangées d'arbres et d'arbustes plantes sur les terres agricoles (Figure6.10), pour protéger les cultures et les sols contre l'érosion éolienne, et pour améliorer le microclimat pour la production agricole.

6.6.1.1 Le type du prise-vent projeté

Pour notre cas, la localité du périmètre est la zone aride, où la période sèche s'étale tout l'année, donc on propose les conifères a causé à leur grande résistance à la sécheresse. Il existe de nombreuse variétés de conifère et parmi lesquels : cyprès, cèdres, pin, tamarix.. . Les espèces recommandées sont le pin et le tamarix.

6.6.1.2 Caractéristiques physiques du prise vent projeté

- L'orientation : pour intercepter et réduire l'effet du vent, le brise-vent doit être perpendiculaire aux vents dominants (le vent dans M'ziraa est orienté au Nord-Est et Sud-Ouest).
- L'espacement : plus le brise-vent est large (plusieurs rangées), plus la perméabilité au vent à travers les arbres est faible, plus l'assurance de protection contre les problèmes phytosanitaires est élevée.

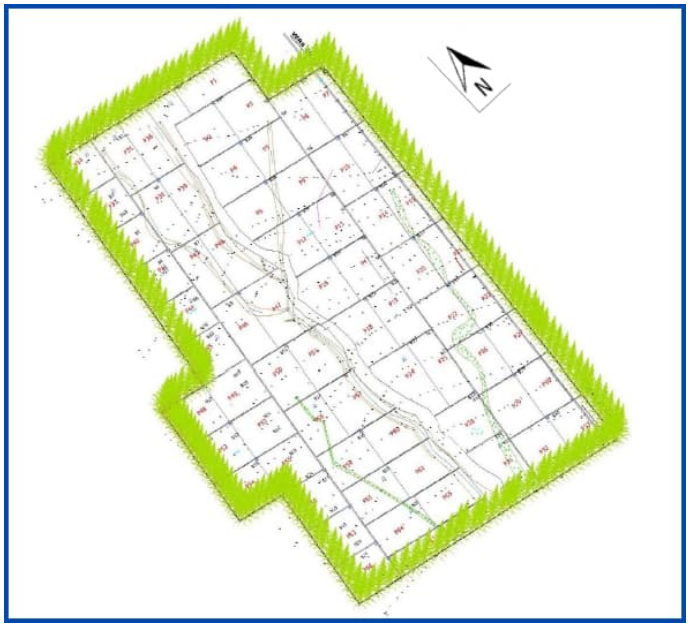


FIGURE 6.10 – Image 3D représente le périmètre après l'installation de prise vent

Pour la protection globale du périmètre, un rideau périphérique de brise vent entouré toute le périmètre, ce rédeau est constitué d'un seul rangée d'arbre de haute taille planté chaque 2m. On peut estimer le nombre des arbres nécessaire pour ce prise-vent comme suit :

TABLE 6.3 – La langueur et le nombre des arbres pour la prise-vent

Ecartement (m)	**Longueur totale de prise vent (m)**	**Nombre des arbres**
2	8325.80	4163

6.6.2 Modes d'exécution appropriés des travaux de terrassement

• Pour la répartition uniforme des charges latérales du sol, il faut creuser les tranchées régulièrement en ligne droite. Voici les raisons techniques, économiques et sécuritaires de ce technique :

• Réduire au minimum les pertes d'énergie (pertes de charge).

• Éliminer les obstacles qu'ils provoquent des chocs et des turbulences qui dissipent l'énergie de l'eau, ces obstacles comme : les coudes et les sinuosités (méandres).

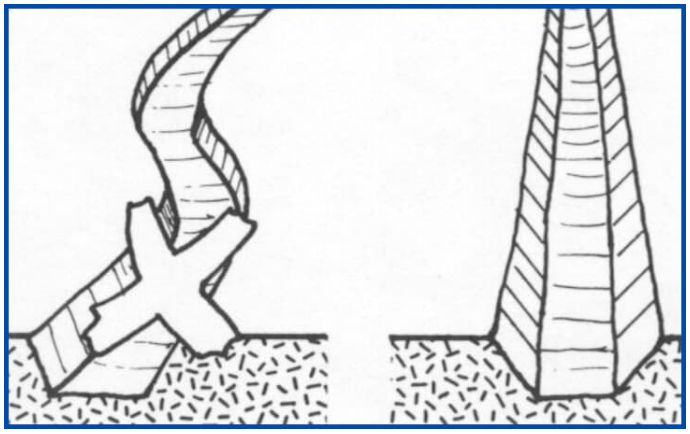


FIGURE 6.11 – La structure correcte pour exécuter les fossés [11]

- Faciliter à inspecter et à curer avec des équipements mécaniques.
- Permettre un écoulement régulièr de l'eau, cela empêche la formation de poches stagnantes.

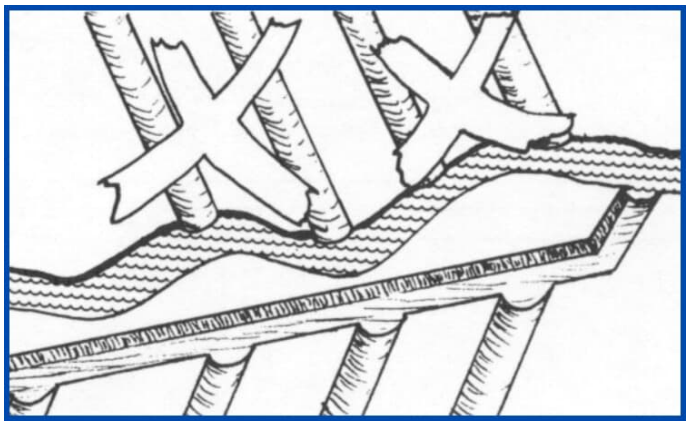


FIGURE 6.12 – Évitement de recreuser (curage) un cours d'eau naturel ou d'y jeter des fossés secondaires [11]

• Le changement de direction abrupt au niveau des coudes cause un écoulement brusquement modifié, créant ainsi : • Une perte de charge (perte d'énergie) augmente considérablement la résistance à l'écoulement (frottement), convertissant l'énergie cinétique en chaleur. Cette perte de charge singulière générée par un coude est généralement calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta P_{\text{coude}} = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \tag{6.3}$$

Ou en termes de hauteur de charge h_{coude} :

$$h_{\text{coude}} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \tag{6.4}$$

- ΔP_{coude} : perte de charge due au coude (Pa) ;
- h_{coude} : perte de charge due au coude (mCE) ;
- ζ : coefficient de perte de charge singulière du coude ;
- ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3) ;
- v : vitesse moyenne dup fluide dans la conduite (m/s).

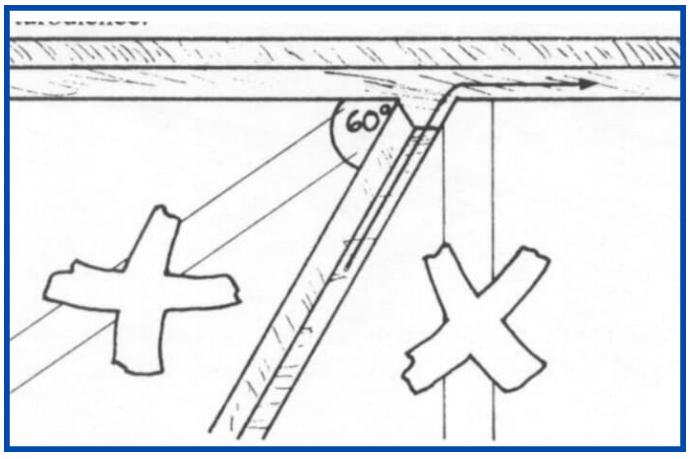


FIGURE 6.13 – Détail de Raccordement de Fossés pour éviter la tourbilance [11]

• Une turbulence localisée ; c'est le passage d'un écoulement laminaire (où les couches de fluide glissent parallèlement) à un écoulement turbulent, désordonné et chaotique, caractérisé par des fluctuations de vitesse et des tourbillons (Figure6.14). Les facteurs de ce phénomène dans les écoulements de fluides sont principalement liés à la rupture de l'équilibre entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

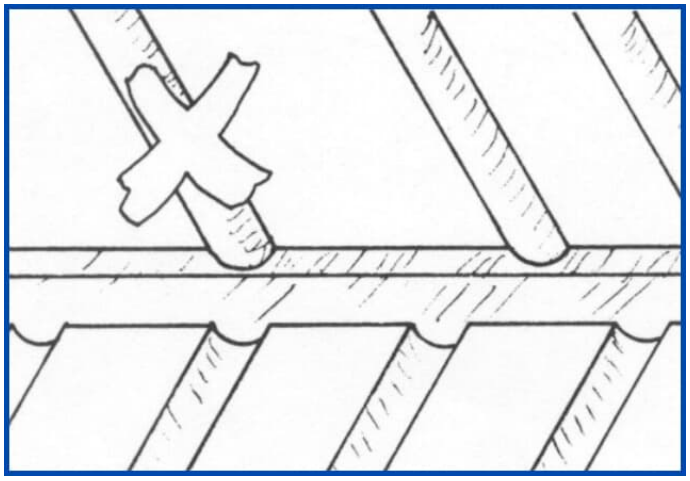


FIGURE 6.14 – Detail de raccordement daux fossés secondaires à un collecteur principal (piquage) [11]

• Une sédimentation et une accumulation des débris, ce qui peut mener au colmatage du fossé ou de la canalisation.

• Une usure accrue des parois en raison de l'emportement des matériaux constitutifs de la berge ou du fond du fossé ; c'est due aux forces de cisaillement et les fluctuations de pression.

Pour celà, les coudes à 90° sont généralement proscrits dans les travaux d'assainissement et de drainage, et sont remplacés par des coudes à 45° (ou des courbes douces dans le cas des fossés ouverts), cela pour des raisons d'hydraulique et de durabilité de l'ouvrage.

6.7 Évaluation de la rentabilité

• Plus on place les drains à grande profondeur, plus on réduit leur nombre, et donc le coût du réseau de drainage s'en réduit. Un drain profond peut créer un gradient hydraulique plus fort, en abaissant localement le niveau de la nappe phréatique ; cela provoque un écoulement d'eau des zones saturantes environnantes (zones de haute pression) vers ce drain (zone de pression plus faible). Cela signifie qu'un seul drain peut drainer et capter verticalement et latéralement l'eau provenant de couches perméables plus éloignées (des nappes phréatiques ou aquifères) (figure 6.15).

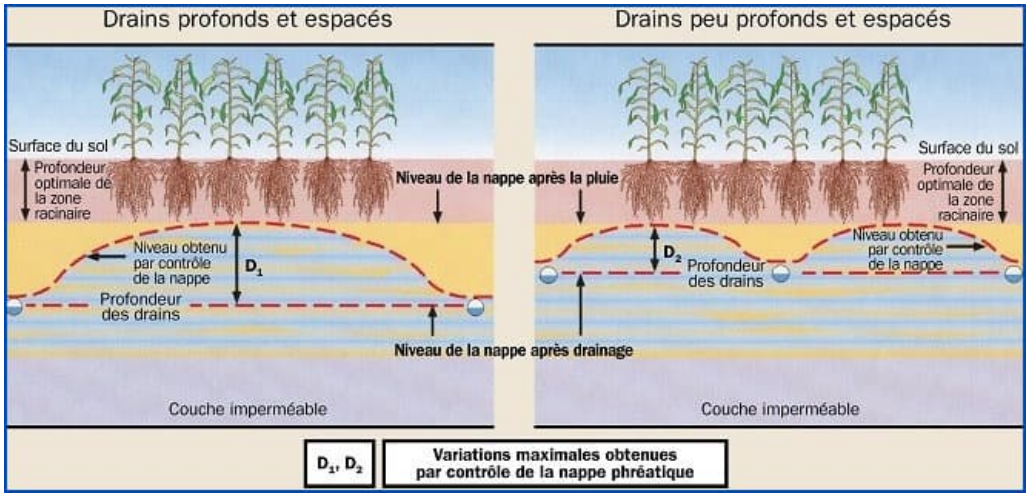


FIGURE 6.15 – L'influence de la profondeur des drains sur le contrôle de la nappe

☐ **Source : Ontario.ca** Plus le drain est profond, plus le gradient ' i ' est élevé, donc plus le débit augmente, ce qui accentue le rabattement et forme une sorte de cône de dépression dans le sol à cause de :

- L'écoulement radial de l'eau vers le drain ;
- L'augmentation du gradient hydraulique à mesure que le drain est plus profond ;
- La perméabilité du sol, où plus le sol est perméable, plus le rabattement est étendu.

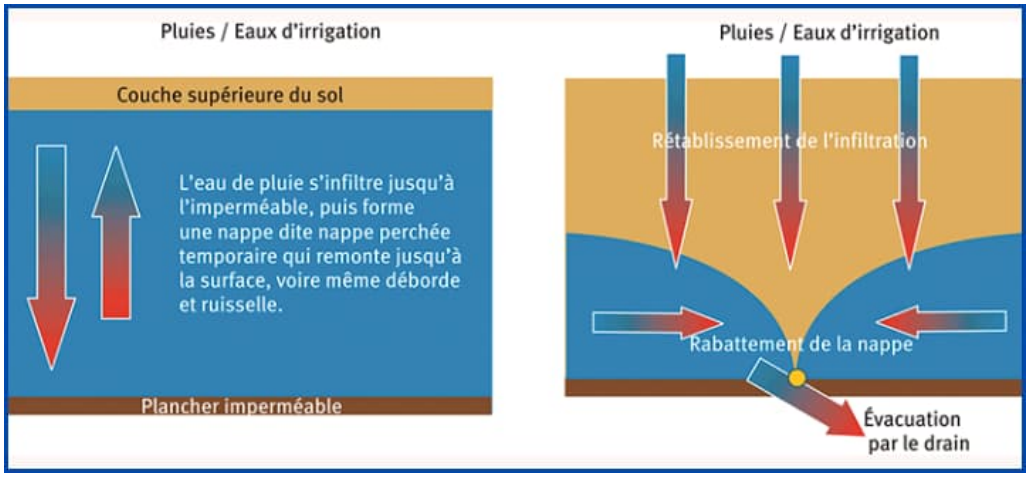


FIGURE 6.16 – Représentation schématique d'une nappe perchée temporaire en situation non drainée (à gauche) et drainée par tuyaux enterrés (à droite)

.

☐ **Source : Neutralisation de drainage en zone humide, Carnet n° 2.2 du Réseau d'Échanges et de Récupération des Zones Humides (RERZH).** • La loi de Darcy permet de quantifier ce débit d'eau vers le drain, alors que cette loi montre que le gradient hydraulique (la pente de la nappe phréatique) est la force motrice qui pousse l'eau à s'écouler vers les zones de plus faible où :

$$Q = -vA \tag{6.5}$$

$$v = Ki \tag{6.6}$$

- v : vitesse apparente de l'écoulement ;

- K : conductivité hydraulique du sol, dépondant du milieu poreux ;
- A : surface de passage ;
- i : gradient hydraulique, ceci fait référence au changement du niveau d'eau par unité de distance le long de la direction de la diminution maximale de la charge. En terme simple, il s'agit du taux de variation de la charge totale par unité de distance d'écoulement dans une direction particulière, où :

$$i = \frac{dh}{dl} \tag{6.7}$$

- dh : différence de niveau d'eau entre deux points (charge hydraulique) ;
- dl : distance entre ces deux points.

L'écoulement des eaux souterraines obéit à la loi de Darcy. Cette loi n'est valable que dans des conditions nettement définies :

1. Milieu homogène et isotrope ;

2. Substratum imperméable horizontal ;

3. Ecoulement en régime laminaire.

- Economiquement, les drains profonds permettent un espacement plus grand entre les drains, ce qui réduit le nombre de tranchées à creuser et le métrage total de tuyaux nécessaires. Cela peut potentiellement réduire le coût global si le sol est homogène et permet une bonne infiltration. Mais attention ! le drainage trop profond n'est pas toujours la solution idéale :
- Le creusement le plus profond peut coûter plus cher en énergie et en équipement ; cela signifie que le coût d'excavation est chère. Il peut également introduire une intervention complexe en cas de problème, due à l'accès difficile pour les entretiens.
- Dans les sols très perméables, le drainage trop profond peut rendre les nappes phréatiques vulnérables à l'épuisement, surtout dans le cas de l'infiltration accélérée (sols très perméables) ; le drain agit comme un siphon qu'il capte cette eau avant qu'elle atteigne la nappe phréatique, réduisant ainsi sa recharge naturelle, et entraînant la sècheresse des puits, la mort de certaines plantes à racines profondes et même des déséquilibres écologiques.
- Le drainage excessif modifie le régime naturel de l'eau dans le sol, ce qui peut perturber le cycle hydrologique, affecter la biodiversité locale et la stabilité des écosystèmes, et les drains profonds sont plus sensibles à l'envasement ou à la pression du sol.

Il faut trouver un compromis optimale entre l'efficacité du système et son coût(de la main-d'œuvre, des matériaux et de la machinerie), autrement dit, un équilibre entre les trois éléments : la profondeur, l'espacement, et le coût total, ceci est un défi commun en drainage agricole, dépend de plusieurs facteurs : le type de sol, le climat et les cultures.

En 1980, Polon et al. ont mené une étude sur sept distances différentes entre les drains allant de six à vingt-quatre mètres dans un sol argileux mal drainé naturellement en Ontario, ils ont constaté que plus l'espacement entre les drains était petite, plus les rendements en maïs, en soja et en blé étaient élevés. Dans une autre expérience menée sur un type de sol similaire en 1995, Madani et Brinton ont constaté que le taux de rabattement de la nappe s'améliorait significativement, lorsque l'écartement entre les drains était réduite de douze à six mètres puis de six à trois mètres.

Bien que les deux expériences démontrent le potentiel d'investissement et les résultats envisageables, il convient de noter qu'une pose trop rapprochée des tuyaux dans les sols argileux implique une dépense superflue, même si elle n'implique pas de dommages au sol proprement dit. En effet, de grandes quantités d'eau ne peuvent être drainées des sols argileux en raison de leur forte capacité de rétention d'eau et de leurs propriétés capillaires.

Pour les sols sableux grossiers à faible porosité, la profondeur des drains est un élément clé à prendre en compte, mais il est toutefois important ne pas trop drainer l'eau dans ce cas, car cela pourrait considérablement abaisser le niveau des eaux souterraines, et limiter ainsi l'apport d'eau au

système racinaire.

6.8 Devis contitatif et estilatif

$N°$	Designation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
1.Digue en terre					
1.1	Décapage de la couche végétale de l'epaisseur de 0.5m	m^3	4141.40625	50.00	207070.3125
1.2	Remblai compacte du corps de la digue	m^3	17600	600.00	10560000
1.3	Protection du talus amont par enrochement de l'épaisseur de 1.14 m	m^3	4129.48	1500.00	6194220
1.4	Protection du talus aval par gravier de l'épaisseur de 0.2 m, d = 40 - 120 mm	m^3	602.55	1700.00	1024335
1.5	Geotextil du type de filtration	m^2	3012.74	450.00	140733
1.6	Protection de la crête de la digue par deux couches de gravier de l'épaisseur de :				
-	$ep = 10cm$, pour $d = 10 - 20mm$	m^3	88.35	1700.00	150195
-	$ep = 20cm$, pour $d = 40 - 60mm$	m^3	176.7	1700.00	300390
1.7	Déblai en terrain rocheux	m^3	2208.75	500.00	1104375
1.8	Paroi d'étanchéité	m^2	3534	32000.00	113088000
2. Canal de protection					
2.1	Décapage de la tranchée	m^3	549.3204	150.00	82398.06
2.2	Déblai	m^3	1039.2529	300.00	311775.87
2.3	Ouvrage de jonction	U	1	400000.00	400000
3. Réseau de drainage pour lutter contre la salinisation					
3.1	Déblai	m^3	11448.25	300.00	3434475
3.2	Gravier	m^3	2575.3523	1200.00	3090422.76
3.3	Remblai de la tranchée	m^3	5142.0465	150.00	771306.9728
3.4	Drains	ml	8800	250.00	2200000
3.5	Collecteur	ml	990	400.00	396000
3.6	Regards	U	17	35000.00	595000
4	Evacuation de terres excédentaires à la décharge	m^3	8514.9535	500.00	425776.75
Total		144 476 473.7			
TVA		27 450 530			
Total TTC		171 927 003.7			

6.9 Ergonomie dans un chantier de terrassement

L'origine du mot vient du grec "ergon", qui signifie travail, et "nomos", qui signifie loi, soit littéralement “la loi du travail”. Selon l'ANACT (Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail), l'ergonomie concerne les connaissances sur le fonctionnement de l'homme en activité, pour concevoir des tâches, des outils, des machines, des bâtiments et des systèmes adaptés.

6.9.1 Les acteurs de la prévention des risques professionnels au niveau national

Le système algérien de prévention des risques professionnels dans les travaux d'hydraulique est régi par le cadre général de l'Hygiène, de la Sécurité et de la Médecine du Travail **(HSMT)**, avec des prescriptions spécifiques au secteur du Bâtiment, des Travaux Publics et de l'Hydraulique**(BTPH)**.

L'Organisme de Prévention des Risques Professionnels dans les Activités du Bâtiment, des Travaux Publics et de l'Hydraulique **(OPREBATPH)** est l'institution spécialisée dans la prévention pour ce secteur, il travaille en collaboration avec la CNAS (Caisse Nationale des Assurances Sociales) et l'Inspection du Travail pour assurer le respect des normes de sécurité. Les missions principales de cet organisme incluent :

1. L'assistance technique et les conseils aux entreprises (visites de chantiers, évaluations des risques).

2. L'étude et l'émission d'avis techniques sur les PHS soumis par les entreprises.

3. L'information et la formation des employeurs et des travailleurs sur les risques spécifiques (travaux en hauteur, en milieu aquatique, manipulation des engins).

6.9.2 Cadre Réglementaire Fondamental

Le dispositif est principalement structuré autour de deux textes majeurs :

1. Loi n° 88-07 du 26 janvier 1988 relative à l'hygiène, à la sécurité et à la médecine du travail, qui établit les principes généraux (obligation de l'employeur d'assurer la sécurité, respect des règles par le travailleur, etc.).

2. Décret exécutif n° 05-12 du 8 janvier 2005 relatif aux prescriptions particulières d'hygiène et de sécurité applicables aux secteurs du bâtiment, des travaux publics et de l'hydraulique. Ce décret est la référence pour les chantiers hydrauliques (barrages, conduites, réseaux d'assainissement, etc.).

6.9.3 Evaluation des risques

C'est une démarche essentielle en santé et sécurité au travail. Elle consiste à identifier, analyser et réduire les dangers potentiels dans un environnement professionnel. Voici les objectifs de cet évaluation :

6.9.3.1 Identifier les dangers

Dans la majorité des accidents de travail, les action dangereuse et les condition dangereuse sont souvent combinés, alors l'objectif de la prévention est d'agir sur les deux plans pour réduire les risques au maximum.

6.9.3.2 Mettre en place des mesures de prévention ou de intervention

- ***Protection collective***

Les mesures de sécurité et les protocoles d'urgence doivent être appliqués rigoureusement. Elles se déclinent en deux axes principaux : la pré n'vention, et l'intervention post-accident.

Premièrement : les mesures de la prévention

• Rédiger un Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé (PPSPS) ou un Plan de Prévention (si entreprise extérieure), qui détaille les mesures spécifiques pour ces risques.

• Plan d'Hygiène et de Sécurité (PHS) est remis obligatoirement avant toute intervention par l'entrepreneur au maître d'ouvrage (Arrêté du 26 juillet 2008). Ce document doit notamment détailler :

1. L'évaluation des risques spécifiques au site (risques d'éboulement pour les tranchées profondes de canalisations, risques biologiques, etc.).

2. Les moyens de protection collective et individuelle mis en œuvre.

3. Les mesures d'urgence, de premiers secours et d'évacuation.

• Une salle ou un poste de secours équipé, placé sous la garde d'un secouriste qualifié, doit être aménagé pour les blessures légères et pour l'accueil des blessés.

Deuxièmement : les mesures d'intervention

• Interrompre immédiatement les travaux, et couper les machines ou les sources d'énergie impliquées ou dangereuses.

• Éloigner la victime d'un danger imminent.

• Alerter les secours, et leurs donner l'adresse exacte du chantier, la nature de l'incident, le nombre et l'état des victimes, et les dangers potentiels pour les secours, et désigner une personne pour les accueillir.

• Assurer les gestes de premier secours par les sauveteurs secouristes du travail (SST) en attendant l'arrivée des professionnels, tout en surveillant l'état de la victime.

• Si nécessaire, organiser l'évacuation des autres travailleurs vers un point de rassemblement prédéfini.

• Isoler le lieu de l'accident pour préserver les preuves pour l'enquête à venir.

• Notifier l'accident aux autorités compétentes.

• Après l'incident, une enquête interne est indispensable pour analyser les causes, identifier les manquements et mettre à jour les protocoles de sécurité afin d'éviter qu'un tel événement ne se reproduise.

• *Protection individuelle*

• Porter obligatoirement de la ceinture de sécurité par les conducteurs.



FIGURE 6.17 – La ceinture est votre meilleur bouclier

☐ **Source : MSA Santé Sécurité en Agriculture.**

Selon le code du travail, un équipement de protection individuelle (EPI) est un dispositif ou moyen porté ou tenu par une personne pour se protéger contre des dangers liés à son activité professionnelle. Cela a pour but de réduire les risques résiduels lorsque les mesures collectives ne suffisent pas, et prévenir les accidents et maladies professionnelles.

• Vêtements de travail : Confortables et non flottants, équipés de bandes haute-visibilité ou surmontés d'un baudrier haute-visibilité, adaptés aux conditions climatiques [3], où :

Pour la visibilité de jour : les matières utilisées sont des matières fluorescentes telles que : Jaune HV, orange HV, et rouge HV.

Pour la visibilité de nuit : on dispose des bandes rétroréfléchissantes pour réfléchir la lumière des phares. La norme impose des règles strictes sur :

- La largeur minimale des bandes (50 mm) ;
- Leur positionnement (tour du torse, épaules, bras, jambes) ;
- La continuité du marquage.

• Chaussures ou bottes de sécurité : spécialement conçus pour prendre en compte les risques liés aux déplacements dans un environnement difficile (chute de plain-pied, faux mouvements sur sol accidenté), les risques mécaniques (choc, écrasement, coupure...) et thermiques [3].

• Autres équipements : gants de protection, casque ou casquette anti-heurt, protections auditives, masque anti-poussière et lunettes.



FIGURE 6.18 – Équipements de Protection Individuelle (EPI) en hiver et en été, sur chantier de drainage [3]

Le choix d'un équipement repose au préalable sur l'analyse des risques auxquels le personnel est exposé, ainsi que des contraintes liées à l'activité et aux utilisateurs [3].

6.10 Conclusion

En somme, il apparaît que une bonne organisation de chantier permet d'atteindre les objectifs du projet de drainage, en assurant la qualité, le respect des délais et la maîtrise des coûts, tout en optimisant les conditions de travail.

Conclusion général

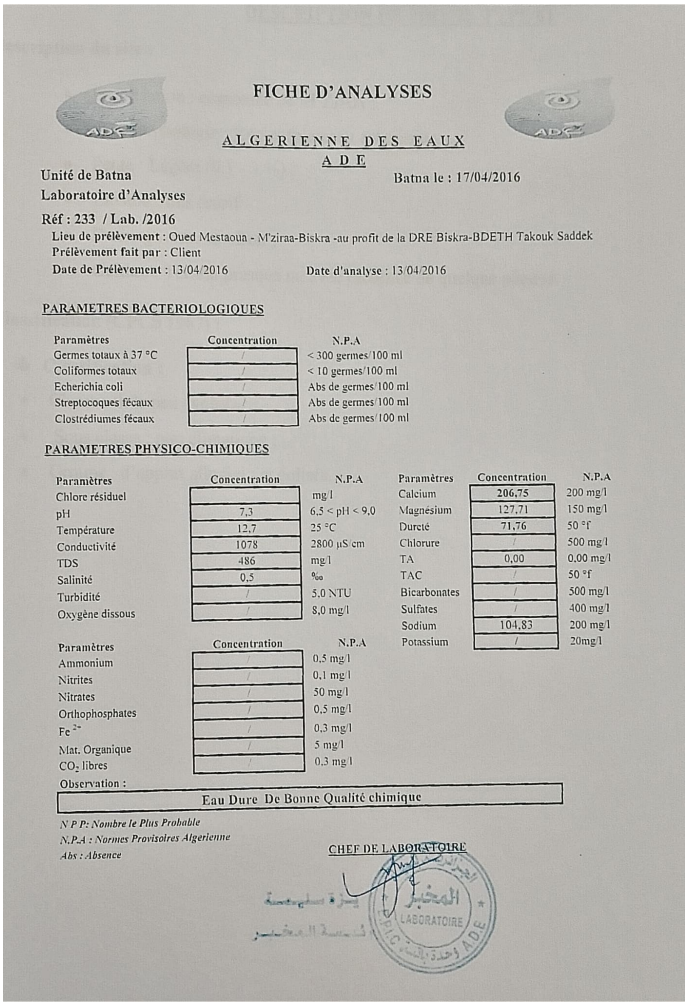
Dans l'objectif d'améliorer le secteur agricole dans les régions sahariennes ; l'Algérie a mis en place plusieurs politiques et stratégies avec récemment la politique du renouveau agricole. Pour l'étude de cette politique, j'ai pris comme modèle la région de Biskra où je réalise une analyse générale qui m'a permis de choisir l'une des localités qui semblent répondre aux composants de cette politique, c'est la localité de la région M'ziraa, wilaya de Biskra. La nécessité de politiques d'action et d'incitation contribuent à soutenir le secteur agricole au niveau de la zone de M'ziraa Biskra par :

1. Maintenir la productivité agricole à partir la fertilisation.
2. Stimuler le secteur privé à investir dans l'agriculture à travers la promotion des investissements agricoles.
3. Faciliter les procédures relatives à la propriété des terres, et de l'exploitation des eaux souterraines.
4. Accompagner les investisseurs dans le secteur agricole par des ingénieurs agronomes et de mentors.
5. Empêcher l'urbanisation du compte des terres agricoles.

À travers la présente étude, j'ai essayé d'établie un diagnostic pour identifier les raisons du manque des ressources en eau, les sources des entraves et identifier les facteurs qui contribuent à la réussite du secteur agricole, notamment au niveau des pôles agricoles algériens tels que la région de M'ziraa.

Annexes

.1 Fiche des analyses des eaux



FICHE D'ANALYSES

ALGERIENNE DES EAUX
A D E

Unité de Batna
Laboratoire d'Analyses

Batna le : 17/04/2016

Réf : 233 / Lab. /2016
Lieu de prélèvement : Oued Mestaoua - M'ziraa-Biskra -au profit de la DRE Biskra-BDETH Takouk Saddek
Prélèvement fait par : Client
Date de Prélèvement : 13/04/2016 Date d'analyse : 13/04/2016

PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES

Paramètres	Concentration	N.P.A
Germes totaux à 37 °C	/	< 300 germes/100 ml
Coliformes totaux	/	< 10 germes/100 ml
Echerichia coli	/	Abs de germes/100 ml
Streptocoques fécaux	/	Abs de germes/100 ml
Clostrédiumes fécaux	/	Abs de germes/100 ml

PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Paramètres	Concentration	N.P.A
Chlore résiduel		mg/l
pH	7,3	6,5 < pH < 9,0
Température	12,7	25 °C
Conductivité	1078	2800 µS/cm
TDS	486	mg/l
Salinité	0,5	‰
Turbidité	/	5,0 NTU
Oxygène dissous	/	8,0 mg/l

Paramètres	Concentration	N.P.A
Calcium	206,75	200 mg/l
Magnésium	127,71	150 mg/l
Dureté	71,76	50 °f
Chlorure	/	500 mg/l
TA	0,00	0,00 mg/l
TAC	/	50 °f
Bicarbonates	/	500 mg/l
Sulfates	/	400 mg/l
Sodium	104,83	200 mg/l
Potassium	/	20mg/l

Paramètres	Concentration	N.P.A
Ammonium	/	0,5 mg/l
Nitrites	/	0,1 mg/l
Nitrates	/	50 mg/l
Orthophosphates	/	0,5 mg/l
Fe^{2+}	/	0,3 mg/l
Mat. Organique	/	5 mg/l
CO_2 libres	/	0,3 mg/l

Observation :
Eau Dure De Bonne Qualité chimique

N P P: Nombre le Plus Probable
N.P.A : Normes Provisoires Algerienne
Abs : Absence

CHEF DE LABORATOIRE

LABORATOIRE A.D.E

.2 Résultats analytiques du profil 10

Profondeur (cm)	0-50	50-110	>110
Charge en cailloux (%)	< 5 peu caillouteux	10	10
Granulométrie			
Argiles (%)	12,09	4,73	10,2
Limons fins (%)	13,35	12,86	12,6

Suite de l'Annexe 2			
Limons grossiers (%)	5,25	11,02	7,52
Sables fins (%)	35,39	33,87	39,18
Sables grossiers (%)	33,92	37,52	30,5
Texture	LS	LS	LS
Carbone -C- (%)	0,0857	0,3021	0,3477
Azote -N- (%)	0,0074	0,0260	0,0300
C/N	11,60	11,60	11,60
CaCO3 total (%)	71,14	54,62	64,29
CaCO3 actif (%)	11	9,5	12,50
pH	7,24	7,60	8,50
CE mmhos/cm	1,568	1,156	0,546
Densité apparente	1,3687	1,3478	1,2145
Humidité CR en %	23,2658	21,6580	22,2367
Humidité au PFP (%)	9,4892	8,8136	8,9435
La RU (%)	14,8025	13,8247	13,4528

.3 Valeurs de la profondeur équivalente 'd' de Hooghoudt en fonction de l'espacement 'L'et de la profondeur de la couche imperméable'D'.

TABLE 7.1 *Equivalent depth 'd' for commonly used pipe drains* (r_o = 4–10 cm; u > 0·3 m)

D(m)	L (m)→ 5	7·5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	75	80	85	90	100	150	200	250
0·50	0·45	0·50	0·50	0·50	0·50	0·50	0·50												
0·75	0·60	0·65	0·70	0·70	0·75	0·75	0·75	0·75	0·75	0·75	0·75								
1·00	0·65	0·75	0·80	0·80	0·90	0·90	0·95	0·95	0·95	0·95	0·95	0·95	0·95	0·95	1·00	1·00	1·00	1·00	1·00
1·25	0·70	0·80	0·90	1·05	1·05	1·10	1·10	1·15	1·15	1·15	1·15								
1·50		0·90	0·95	1·10	1·20	1·25	1·30	1·30	1·35	1·35	1·35								
1·75		0·90	1·00	1·20	1·30	1·40	1·40	1·50	1·50	1·55	1·55								
2·00			1·10	1·30	1·40	1·30	1·55	1·60	1·65	1·70	1·70	1·80	1·80	1·80	1·85	1·85	1·90	1·90	1·95
2·25			1·15	1·35	1·50	1·70	1·70	1·75	1·60	1·85	1·85								
2·50				1·40	1·55	1·70	1·40	1·85	1·95	2·00	2·00								
2·75				1·40	1·65	1·75	1·90	2·00	2·05	2·10	2·20								
3·00				1·45	1·65	1·85	1·95	2·10	2·15	2·25	2·30	2·50	2·50	2·55	2·55	2·60	2·70	2·80	2·85
3·25				1·50	1·70	1·90	2·05	2·15	2·35	2·35	2·40								
3·50				1·50	1·75	1·95	2·10	2·25	2·35	2·45	2·55								
3·75				1·50	1·80	1·95	2·15	2·50	2·45	2·55	2·65								
4·00					1·80	2·00	2·20	2·35	2·50	2·60	2·70	3·05	3·10	3·10	3·15	3·25	3·45	3·60	3·65
4·50					1·85	2·10	2·30	2·50	2·65	2·75	2·65								
5·00					1·90	2·15	2·40	2·60	2·75	2·90	3·00	3·50	3·55	3·60	3·65	3·80	4·10	4·30	4·45
5·50						2·20	2·45	2·65	2·85	3·00	3·15								
6·00							2·50	2·70	2·90	3·10	3·25	3·85	3·95	4·00	4·10	4·25	4·70	4·95	5·15
7·00							2·55	2·80	3·05	3·25	3·45	4·15	4·25	4·35	4·40	4·60	5·20	5·55	5·80
8·00							2·55	2·85	3·15	3·35	3·55	4·40	4·50	4·60	4·70	4·95	5·70	6·15	6·45
9·00								2·90	3·20	3·45	3·65	4·55	4·70	4·80	4·95	5·25	6·10	6·65	7·00
10·00									3·25	3·50	3·75	4·75	4·90	5·05	5·20	5·85	6·45	7·10	7·55
12·50												5·00	5·20	5·40	5·55	5·90	7·20	8·05	8·70
15·00												5·20	5·40	5·40	5·80	6·25	7·75	8·85	9·65
17·50												5·30	5·55	5·75	6·00	6·45	8·20	9·45	10·40
20·00													5·60	5·85	6·10	6·60	8·55	9·95	11·10
22·00													5·75	5·95	6·20	6·80	9·00	10·70	12·10
30·00																	9·25	11·30	12·90
35·00																	9·45	11·60	13·40
40·00																		11·80	13·80
45·00																		12·00	13·80
50·00																		12·10	14·30
60·00																			14·60
~	0·70	0·95	1·15	1·55	1·90	2·25	2·60	2·90	3·25	3·55	3·90	5·40	5·25	6·00	6·25	6·80	9·55	12·20	14·70

Roughly

d = constant for D > H.

.4 Méthodologie pour faire suivi de la nappe

• Le niveau de la nappe phréatique monte après des fortes pluies d'au moins 30 mm, parfois beaucoup plus après une période de sécheresse. Cette montée est surveillée par trois à cinq relevés

ou mesures quotidiens dans tous les puits pendant trois à cinq jours. Afin d'avoir une bonne idée de la situation, il faut prendre des lectures de nappe trois fois dans la saison, soit après trois pluies importantes. Advenant qu'il pleuve pendant la prise de donnée, la série de prise de mesure est arrêtée puis recommencée du début, quand l'heure de la fin de la pluie, la quantité de pluie tombée et les heures de prise de données doivent être notées.

• Sur l'ensemble du profil, afin d'observer la remontée d'une nappe causée par une pluie ainsi que son rabattement, des puits doivent être installés sur un minimum de trois drains consécutifsl. Un puits d'observation est un tuyau en PVC d'un diamètre compris entre 2 et 4 cm, et afin que l'eau de la nappe puisse y pénétrer sans entrave, une cinquantaine de perforations d'environ 7,5 mm de diamètre sont percées sur toute sa longueur. Afin d'empêcher le sol de s'infiltrer, une enveloppe de géotextile fin ferme le tuyau à sa base et entoure le tuyau sur toute sa longueur. Les puits seront installés après la dernière application de fertilisants ou pulvérisation afin d'éviter de nuire aux opérations culturales.

• Les puits d'observation doivent être installés à une profondeur similaire à celle des drains (Figure19). Seul le puits destiné à mesurer la nappe de surface est installé à une profondeur plus faible, soit à 0,4 m. Les étapes d'installation sont les suivantes [1] :

1. Creuser un trou jusqu'à la profondeur des drains (d) avec une tarière de 5 cm de diamètre ;

2. lnsérer le puits d'observation dans le trou ;

3. Remplir tout autour du tuyau avec du sable jusqu'à 40 cm de la surface ;

4. Colmater l'espace autour du tuyau (puits d'infiltration) sur les 40 cm supérieurs du sol avec de la bentonite, afin d'empêcher l'eau de surface ou une nappe perchée de couler le long de la paroi du trou et de s'infiltrer dans le tuyau, la bentonite est une argile reconnue pour ses propriétés d'étanchéité. Environ 500 grammes de bentonite sont nécessaires pour colmater un puits, où le puits d'observation peu profond doit seulement être colmaté sur les dix cm du haut.

• Le plan de drainage permet de localiser l'emplacement des drains. et pour les situer précisément, une sonde à drains doit être utilisée (Figure19). Pour les trouver, il faut enfoncer la sonde dans le sol jusqu'à la profondeur supposée des drains et répéter cette opération tous les 7,5 cm en se déplaçant perpendiculairement aux drains. Lorsque la pointe de la sonde heurte un drain, on sent une résistance, la pointe de la sonde perfore alors le drain. Également, le passage de la charrue-taupe a pour effet d'amenuiser la tranchée où est installé le drain, il est donc en général plus facile de faire pénétrer la sonde dans le sol juste au-dessus d'un drain [1].

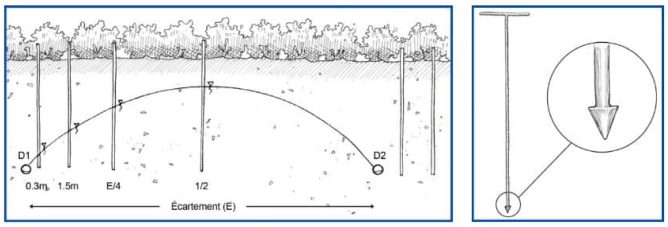


FIGURE 19 – Positionnement des puits par rapport aux drains(à gauche), et La sonde à drain (à droite) [1]

• Quand les puits sont installés, il faut mesurer la distance entre les éléments. Pour ce faire, il faut dérouler un ruban à mesurer en plaçant le début directement au-dessus du 1er drain. À l'aide d'un niveau d'arpentage, la hauteur de chaque puits d'observation, la surface du sol à côté de chaque puits et le fond des drains instrumentés doivent être mesurés [1]. Ces lectures du niveau doivent ensuite être rapportées par rapport à une hauteur de référence. Cette étape permet de positionner la hauteur de la nappe par rapport à la surface du sol et à la profondeur des drains [1]. Avant cela, une hauteur référencée pour le repère de nivellement 'RN' est décidée aléatoirement, par exemple un

clou planté dans un arbre en bordure du champ à une hauteur décidée aléatoirement (50 mètres par exemple) .

• La lecture du niveau pour le repère de nivellement 'RN' est relevée, suivie de la lecture du niveau pour le haut du puits 'HP' ; la position de **HP** est **a** mètres plus basse que **RN**. La hauteur référencée pour **HP** est donc : $HP = RN - a$.

• La lecture du niveau pour la surface du sol 'SS' à côté du puits est relevée ; la position de **SS** est **b** mètres plus basse que **RN**. La hauteur référencée pour **SS** est donc : $SS = RN - b$.

• Puisqu'il serait laborieux de mettre la règle sur les drains pour prendre les lectures du niveau, la sonde à drain est utilisée et agit comme rallonge à la règle, où il est important de noter la longueur exacte de la sonde ; La pointe de la sonde est placée au fond du drain et la règle au-dessus du manche. La lecture du niveau pour le fond du drain 'FD' est de **c** mètres à laquelle on additionne la longueur de la sonde 'l', ce qui correspond à une lecture de niveau de $c + lm$, alors la position de **FD** est de c+l m plus basse que RN. La hauteur référencée pour **FD** est donc de $FD = RN - (c + l)$.

• Pour connaître la profondeur de l'eau dans le puits, par rapport au haut de celui-ci, la hauteur d'eau est mesurée à l'aide des appareils suivants :

1. Une sonde électrique graduée qui émet un signal dès que le bout de sa tige touche l'eau [1] ;

2. Un tuyau gradué avec un intérieur vide et prolongé par un tuyau de plastique flexible (il peut être relié à un embout de plastique) [1]. Alors que l'utilisateur insère le tuyau dans le puits d'observation en soufflant dedans, le bruit des bulles indique que l'extrémité du tuyau gradué a atteint l'eau.

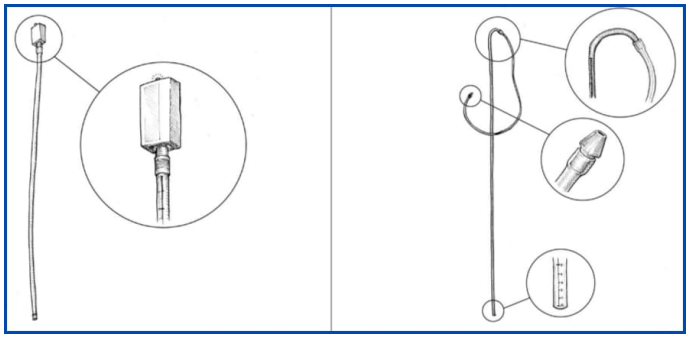


FIGURE 20 – Tige graduée avec la sonde au bout (à gauche), et tuyau prolongé d'un embout en plastique (à droite) [1]

• Pour comparer les éléments entres eux et de mettre les résultats en graphiques, il est important de noter, à l'aide de la graduation sur la tige, la distance d entre le haut du puits 'HP' et la nappe d'eau 'NE' à l'intérieur du puits ; il est possible de référencer la position de **NE** en soustrayant d à la position référencée de **HP**. Donc : $NE = HP - d$.

Bibliographie

[1] Agri-Réseau. Guide d'évaluation des systèmes de drainage : Une approche renouvelée, 2023. Document technique sur le diagnostic et l'efficacité du drainage souterrain, publié au Québec.

[2] Abdelhadi Ammari. *Livre de Main d'Hydraulique Générale*. École Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH), Algérie (implicite par l'ENSH), 2014. Manuel de cours.

[3] ANDHAR – Draineurs de France and MSA. *Sécurité sur les chantiers de drainage agricole : Livret d'accueil du salarié*. Mutualité Sociale Agricole (MSA), 2021.

[4] Leila Bahbouh and Ouahiba Aziez. *Cours et exercices corrigés : Drainage et assainissement agricole*. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique, 2022. Année universitaire 2021-2022.

[5] M. Benzerga. *Notes de cours d'IRRIGATION – DRAINAGE*. Université de Chlef, Chlef, Algérie, 2025. Pour les étudiants 3ème année licence Eau et Sol.

[6] Gouvernement de l'Ontario, FAO, Fédération de l'agriculture de l'Ontario, and autres contributeurs. *Drainage des terres cultivées : Les pratiques de gestion optimales*. Publié en collaboration avec Agriculture et Agroalimentaire Canada et la FAO.

[7] Yasmine Hamitouche. *Etude d'aménagement hydraulique d'Oued Allala pour la protection de la ville de Ténès contre les inondations (w. Chlef)*, 2020.

[8] Fayçal HELAL. Qualité, gestion intégrée et cartographie des ressources en eau de la wilaya de biskra. Mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie, Juin 2016. Spécialité : Hydrogéologie et Géothermie.

[9] Bernard Itier and al. *Les plantes et l'eau : Un guide pour explorer les relations entre les plantes et l'eau*. INRA, Université de Lorraine, Arbre, etc. Comprend la section Le bilan hydrique.

[10] A. Mermoud. Assainissement du sol. Cours : "gestion du régime hydrique des sols", École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), dec 2007. Section Sciences et Ingénierie de l'Environnement.

[11] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. *Guide sur le drainage sylvicole*.

[12] Yves Nedelec. *Interactions en crue entre drainage souterrain et assainissement agricole*. PhD thesis, ENGREF (AgroParisTech), 2005.

[13] R. H. Pizarro-Carbone. Le drainage dans un système d'irrigation. Technical Report Feuille d'extension no. 44, Institut Interaméricain de Coopération pour l'Agriculture (IICA), Haïti, juin 1987. Le Bureau en Haïti.

[14] Bénina Touaïbia and Bachir Benlaoukli. *Introduction au Dimensionnement des Retenues collinares*, 2004.

[15] Julien Tournebize, Hocine Henine, and Cédric Chaumont. Gérer les eaux de drainage agricole : du génie hydraulique au génie écologique. *Sciences Eaux & Territoires*, 32(2) :32 – –41, 2020.

[16] Fatima-zohra Ziza, Youcef Daoud, Abdelkader Laboudi, Rachid Bradai, and Ali Zouahra. Evolution de la salinité dans les périmètres de mise en valeur et conséquences sur la diminution des rendements du blé dans une région saharienne : Cas de la région d'adrar. *Algerian Journal of Arid Environment "AJAE"*, 2(2) :4 – −15, 2012.