



## *Remerciements :*

بسم الله الرحمن الرحيم

*Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Allah, Le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour entamer et achever ce travail.*

*Je tiens à adresser mes remerciements à Monsieur Benkaci Tarik, mon encadreur, pour la qualité de son accompagnement tout au long de ce travail. Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils précieux, ainsi que pour son soutien et sa bienveillance tout au long de la réalisation de cette thèse.*

*Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Monsieur Ounnes Rachid et Monsieur Zouaoui Abdeslem, ingénieurs de l'État, pour leur aide précieuse, leur encadrement technique, ainsi que les données et les orientations qu'ils m'ont généreusement fournies.*

*Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique, pour la qualité de l'enseignement reçu, la richesse des savoirs transmis, et leur rôle fondamental dans ma formation aussi bien académique que professionnelle.*

*À mes amis : l'ingénieur Rami Himeur, Saki Sid Ahmed, Sahraoui Mostafa, Soualhi Abdennacer, Aïssa, Zinou, Ali Kissali, Rami Abboud, Messad Abdelmalek, ainsi qu'à tous ceux qui m'ont accompagné de près ou de loin, je vous remercie du fond du cœur pour votre amitié sincère, vos encouragements et les moments partagés.*

**Riadh**

## *Dédicaces:*

*Je dédie ce travail, avec tout le respect et l'amour que je porte dans mon cœur, à mes parents, mon père et ma mère, qui m'ont toujours soutenu moralement. Leur patience, leurs sacrifices silencieux, leur sagesse et leurs prières m'ont guidé à chaque étape de ce parcours. J'offre ce travail modeste comme un gage de remerciement et de gratitude à mes chers parents, en expression de mon amour profond et de ma grande considération. Peu importe ce que je fais, je ne pourrai jamais vous rendre ce que je vous dois.*

*À mes sœurs Mouna, Lina, Sirine, merci pour votre affection, vos encouragements constants et votre présence précieuse dans ma vie.*

*À mon frère Amir, merci pour ton soutien et ta place importante dans ma vie.*

*À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours*

*Universitaire.*

*Enfin, à tous ceux qui croient en moi, qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre, recevez ici l'expression de ma gratitude la plus sincère.*

## ملخص :

تتناول هذه المذكرة دراسة وتصميم شبكة ري فعّالة بمحيط ترومة القطاع 1 جنوب ولاية خنشلة، على مساحة قدرها 150 هكتارًا. تعتمد المنطقة على الآبار كمصدر رئيسي للمياه في ظل قلة تساقط الأمطار، مما استدعى اقتراح نظام ري حديث يضمن التسيير العقلاني للمياه وتلبية احتياجات المحاصيل بدقة.

شملت الدراسة تحليلًا للمعطيات المناخية، والتربة، والخصائص الزراعية، وتم تحديد برنامج زراعي ملائم للموقع. كما تم اعتماد تقنيات ري متطورة تساهم في تحسين المردودية، وترشيد استهلاك المياه، وتقليل التكاليف.

**الكلمات المفتاحية:** شبكة سقي، آبار، محاصيل، موارد مائية.

## Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude et la conception d'un réseau d'irrigation performant dans le périmètre de Tarrouma – Secteur 1, situé au sud de la wilaya de Khenchela, sur une superficie de 150 hectares. La zone d'étude se base essentiellement sur des forages comme principale source d'eau, dans un contexte de faibles précipitations, ce qui a nécessité la proposition d'un système d'irrigation moderne assurant une gestion rationnelle de l'eau et une couverture précise des besoins hydriques des cultures.

L'étude a inclus l'analyse des données climatiques, des caractéristiques du sol et des paramètres agricoles, permettant d'établir un programme de culture adapté au site. Des techniques d'irrigation efficaces ont été adoptées afin d'améliorer le rendement, optimiser la consommation en eau et réduire les coûts.

**Mots-clés :** réseau d'irrigation, forages, Besoins de cultures, ressources en eau.

## Abstract:

This thesis focuses on the study and design of an efficient irrigation network in the Tarrouma – Sector A area, located in the southern part of Khenchela province, covering a total area of 150 hectares. The region relies mainly on wells as the primary water source due to low rainfall, which required the implementation of a modern irrigation system that ensures rational water management and accurate coverage of crop water requirements.

The study includes an analysis of climatic data, soil characteristics, and agricultural parameters, allowing the establishment of a crop program suited to the site. Advanced irrigation techniques were adopted to improve productivity, optimize water consumption, and reduce costs.

**Keywords:** irrigation network, wells, crops, water resources.

# Sommaire

## Chapitre I : Analyse des conditions naturelles

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| I.1 Introduction .....                                       | 3  |
| I.2 Présentation générale de la wilaya de khenchela .....    | 3  |
| I.2.1 Situation géographique de la wilaya de khenchela ..... | 3  |
| I.2.2 Présentation du périmètre d'étude .....                | 4  |
| I.3 Etude géologique .....                                   | 4  |
| I.3.1 Les formations géologiques .....                       | 5  |
| I.3.2 Géomorphologie/Relief .....                            | 5  |
| I.4 Etude climatologique .....                               | 5  |
| I.4.1 Choix de la Station météorologique .....               | 6  |
| I.4.2 Etude des précipitations : .....                       | 6  |
| I.4.3 Températures .....                                     | 7  |
| I.4.4 Humidité relative de l'air .....                       | 8  |
| I.4.5 Les Vents .....                                        | 8  |
| I.4.6 L'insolation .....                                     | 9  |
| I.5 Calcul des indices Agro-météorologiques .....            | 9  |
| I.5.1 Quotient Ombrothermique d'Emberger .....               | 9  |
| I.5.2 Diagramme Ombrothermique de Gaussen .....              | 10 |
| I.6 Etude socio-économique de la zone d'étude .....          | 11 |
| I.7 Conclusion .....                                         | 12 |

## Chapitre II : Ressources en eau-Ressources en sol

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction .....                                           | 13 |
| II.2 Ressources en sol .....                                      | 13 |
| II.2.1 Introduction .....                                         | 13 |
| II.2.2 Classification des sols .....                              | 13 |
| II.2.3 Caractéristiques morphologiques .....                      | 14 |
| II.2.4 Analyse physico-chimique des sols .....                    | 15 |
| II.3 Ressources en eau .....                                      | 17 |
| II.3.1 Caractéristiques Hydrogéologiques de la zone d'étude ..... | 17 |
| II.4 Hydrologie : Calcul de la pluie de projet .....              | 25 |
| II.4.1 Présentation de la station pluviométrique .....            | 25 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| II.4.2 Etude de l'homogénéité de la série pluviométrique : ..... | 27 |
| II.4.3 Ajustement des pluies annuelles .....                     | 28 |
| II.5 Conclusion .....                                            | 30 |

### **Chapitre III : Besoins en eau des cultures**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction .....                                              | 32 |
| III.2 Besoin en eau du périmètre .....                                | 32 |
| III.2.1 Calcul des besoins en eau d'irrigation .....                  | 32 |
| III.3 Calcul de l'évapotranspiration référence ( $ET_0$ ) : .....     | 33 |
| III.3.1 Calcul de la pluie efficace .....                             | 35 |
| III.3.2 Calcul de la réserve en eau du sol .....                      | 35 |
| III.3.3 Occupation des sols .....                                     | 36 |
| III.4 Estimation des coefficients culturaux ( $K_c$ ) : .....         | 36 |
| III.5 Estimation des besoins en eau d'irrigation des cultures .....   | 37 |
| III.5.1 Les besoins de lessivage : .....                              | 37 |
| III.5.2 Estimation des besoins en eau des céréales : .....            | 39 |
| III.5.3 Estimation des besoins en eau des maraîchages : .....         | 40 |
| III.5.4 Estimation des besoins en eau des arboricultures : .....      | 42 |
| III.5.5 Estimation des besoins en eau des Fourragères : .....         | 42 |
| III.5.6 Calcul des besoins en eau pour les assolements 1 et 2 : ..... | 43 |
| III.5.7 Calcul du débit spécifique .....                              | 44 |
| III.5.8 Evaluation du débit caractéristique : .....                   | 45 |
| III.5.9 Estimation des volumes d'eau d'irrigation .....               | 45 |
| III.6 Conclusion : .....                                              | 46 |

### **Chapitre IV : Etude de système d'adduction-distribution**

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction : .....                              | 48 |
| IV.2 Ressources en eau du périmètre : .....            | 48 |
| IV.3 Organisation du périmètre .....                   | 48 |
| IV.4 Ilots et bornes d'irrigation .....                | 48 |
| IV.5 Rôle et fonction de la borne d'irrigation : ..... | 48 |
| IV.6 Calcul hydraulique des bornes : .....             | 49 |
| IV.6.1 Choix du diamètre de la borne .....             | 49 |
| IV.7 Etude du système de pompage .....                 | 50 |
| IV.7.1 Description des pompes .....                    | 50 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| IV.7.2 Calcul de la hauteur manométrique totale d'élévation : ..... | 51 |
| IV.7.3 Calcul du débit de refoulement.....                          | 52 |
| IV.7.4 Calcul du diamètre approximatif .....                        | 52 |
| IV.7.5 Calcul du débit économique .....                             | 52 |
| IV.7.6 Calcul des frais d'investissement.....                       | 53 |
| IV.7.7 Calcul des frais d'exploitation .....                        | 53 |
| IV.7.8 Calcul de la puissance absorbée par la pompe.....            | 54 |
| IV.7.9 Calcul de l'énergie consommée .....                          | 54 |
| IV.7.10 Calcul du bilan Bilan total des frais.....                  | 54 |
| IV.7.11 Choix de nombre et de type de pompe .....                   | 55 |
| IV.8 Dimensionnement du bassin de stockage .....                    | 58 |
| IV.9 Etude du système de distribution.....                          | 58 |
| IV.9.1 Choix du matériau des conduites : .....                      | 58 |
| IV.9.2 Calcul des diamètres : .....                                 | 59 |
| IV.9.3 Calcul des pressions des nœuds et des bornes : .....         | 60 |

## **Chapitre V : Techniques d'irrigation**

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| V.1 Introduction.....                                                  | 66 |
| V.2 Choix des techniques d'irrigation : .....                          | 66 |
| V.3 Classification des techniques d'irrigation.....                    | 66 |
| V.3.1 Irrigation gravitaire : .....                                    | 66 |
| V.3.2 Irrigation localisée (goutte à goutte) : .....                   | 68 |
| V.4 Irrigation par aspersion : .....                                   | 69 |
| V.4.1 Installations mobiles : .....                                    | 70 |
| V.4.2 Avantages et inconvénients de l'irrigation par aspersion : ..... | 71 |
| V.5 Choix des techniques d'irrigation adaptées à la zone d'étude ..... | 71 |
| V.6 Conclusion : .....                                                 | 71 |
| VI.1 Introduction .....                                                | 73 |

## **Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle**

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| VI.2 Dimensionnement d'un réseau d'irrigation Goutte à goutte .....       | 73 |
| VI.2.1 Données générales : .....                                          | 73 |
| VI.2.2 Besoins d'irrigation des cultures en irrigation localisée : .....  | 74 |
| VI.3 Calculs hydrauliques : .....                                         | 76 |
| VI.3.1 Variation maximale du débit selon la règle de Christiansen : ..... | 76 |

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| VI.3.2 Dimensionnement des canalisations du réseau :.....          | 77 |
| VI.3.3 Nombre des goutteurs par rampe :.....                       | 78 |
| VI.3.4 Vérification des pertes de charges :.....                   | 79 |
| VI.4 Dimensionnement d'un réseau d'irrigation par aspersion :..... | 81 |
| VI.4.1 Données générales :.....                                    | 81 |
| VI.4.2 Calcul de la dose pratique :.....                           | 81 |
| VI.4.3 Dimensionnement de l'asperseur.....                         | 81 |
| VI.4.4 Calcul des écartements :.....                               | 82 |
| VI.4.5 Vérification de la pluviométrie de la buse :.....           | 82 |
| VI.4.6 Détermination des paramètres d'arrosages :.....             | 83 |
| VI.4.7 Calcul hydraulique des rampes et la porte rampe :.....      | 84 |
| VI.5 Conclusion.....                                               | 88 |

## **Chapitre VII : Calcul technico-économique**

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| VII.1 Introduction :.....                                                           | 90 |
| VII.2 Les phases d'installation du réseau d'adduction et de distribution :.....     | 90 |
| VII.3 Volumes de terrassement .....                                                 | 91 |
| VII.3.1 Dimensions de la tranchée.....                                              | 91 |
| VII.3.2 Evaluation du cout des travaux de terrassement : .....                      | 93 |
| VII.4 Evaluation des prix de pose des conduites :.....                              | 94 |
| VII.5 Estimation du coût des pièces spéciales.....                                  | 95 |
| VII.6 Estimation des coûts du bassin d'aspiration et des pompes de refoulement..... | 96 |
| VII.7 Estimation du cout de forage .....                                            | 96 |
| VII.8 Coût total de projet :.....                                                   | 97 |
| VII.9 Conclusion .....                                                              | 98 |

## Liste des tableaux :

### Chapitre I : Analyse des conditions naturelles

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I.1 : Caractéristiques de la Station météorologique de Zeribet El Oued.....        | 6  |
| Tableau I.2 : Moyennes mensuelle des précipitations (mm) .....                             | 6  |
| Tableau I.3 : Températures mensuelles (°C) sur une période de 12ans (2010-2022).....       | 7  |
| Tableau I.4 : Moyennes d'Humidité relative de l'air (2012 à 2022). ....                    | 8  |
| Tableau I.5 : Vitesse moyenne des vents (m/s) sur une période de 12ans (2012 à 2022). .... | 8  |
| Tableau I.6 : Valeurs moyennes des durées d'insolation mensuelles (du 2010 à 2022). ....   | 9  |
| Tableau I.7 : Principales Filières Agricoles de la wilaya de kenchela .....                | 12 |

### Chapitre II : Ressources en eau-Ressources en sol

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau II.1 : L'analyse des profils au laboratoire .....                                  | 15 |
| Tableau II.2 : Propriétés hydrodynamiques des sols .....                                   | 16 |
| Tableau II.3 : Les aptitudes culturales associées à chaque zone .....                      | 17 |
| Tableau II.4 : caractéristiques des forages .....                                          | 22 |
| Tableau II.5 : Caractéristique chimique de l'eau d'irrigation .....                        | 23 |
| Tableau II.6 : Classification des eaux en fonction de la conductivité électrique .....     | 24 |
| Tableau II.7 : Risque d'alcalinisation en fonction du SAR .....                            | 24 |
| Tableau II.8 : Station météorologique de Babar .....                                       | 26 |
| Tableau II.9 : Précipitations moyennes mensuelles couvrant la période de 1995 à 2023 ..... | 26 |
| Tableau II.10 : Paramètres de la série pluviométrique .....                                | 27 |
| Tableau II.11 : Résultat du test Mood .....                                                | 28 |
| Tableau II.12 : Test de validité des deux ajustements.....                                 | 29 |
| Tableau II.13 : Résultat de l'ajustement.....                                              | 30 |
| Tableau II.14 : Calcul des pluies mensuelles pour l'année sèche (freq= 80%).....           | 30 |

### Chapitre III : Besoins en eau des cultures

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau III.1 : Le résultat de l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) de la sation Zeribet El Oeud à l'aide du logiciel CROPWAT ..... | 34 |
| Tableau III.2 : Précipitation efficace dans la zone d'étude.....                                                                            | 35 |
| Tableau III.3 : Scénario d'occupation du sol du périmètre .....                                                                             | 36 |
| Tableau III.4 : Coefficients culturaux ( $K_c$ ) des cultures sélectionnées.....                                                            | 37 |
| Tableau III.5 : Volumes de lessivage pour chaque culture .....                                                                              | 38 |
| Tableau III.6 : Calcul des besoins en eau pour le Blé .....                                                                                 | 39 |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III.7 :</b> Calcul des besoins en eau pour l'orge en grain .....            | 39 |
| <b>Tableau III.8 :</b> Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre (AS).....      | 40 |
| <b>Tableau III.9 :</b> Calcul des besoins en eau pour la tomate.....                   | 40 |
| <b>Tableau III.10 :</b> Calcul des besoins en eau pour l'oignon.....                   | 41 |
| <b>Tableau III.11 :</b> Calcul des besoins en eau pour l'Ail.....                      | 41 |
| <b>Tableau III.12 :</b> Calcul des besoins en eau pour l'Amandier .....                | 42 |
| <b>Tableau III.13 :</b> Calcul des besoins en eau pour Le Sorgho.....                  | 42 |
| <b>Tableau III.14 :</b> Calcul des besoins en eau pour l'Avoine .....                  | 43 |
| <b>Tableau III.15 :</b> Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 1 .....  | 43 |
| <b>Tableau III.16 :</b> Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 2 .....  | 44 |
| <b>Tableau III.17 :</b> Estimation des volumes d'eau d'irrigation (Assolement 1) ..... | 46 |

#### **Chapitre IV : Etude de système d'adduction-distribution**

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau IV.1 :</b> Type de bornes en fonction de Débit fourni .....                              | 49 |
| <b>Tableau IV.2 :</b> Calcul des débits des ilots et choix du type de borne .....                   | 49 |
| <b>Tableau IV.3 :</b> Résultats du calcul de la HMT pour différents diamètres .....                 | 52 |
| <b>Tableau IV.4 :</b> Estimation des frais d'investissement selon le diamètre de la conduite.....   | 53 |
| <b>Tableau IV.5 :</b> Estimation des frais d'exploitation selon le diamètre de la conduite .....    | 54 |
| <b>Tableau IV.6 :</b> Bilan total des frais.....                                                    | 55 |
| <b>Tableau IV.7 :</b> Résultats de Sélection nombre de Pompes – Logiciel Caprari.....               | 56 |
| <b>Tableau IV.8 :</b> Variation de la pression de vapeur en fonction de la température de l'eau.... | 57 |
| <b>Tableau IV.9 :</b> Les calculs hydrauliques du réseau de distribution .....                      | 61 |

#### **Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle**

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau VI.1:</b> Les pertes de charge au niveau de la rampe et de la porte-rampe. .... | 80 |
| <b>Tableau VI.2:</b> Les pertes de charge au niveau des conduites. ....                    | 88 |

#### **Chapitre VII : Calcul technico-économique**

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau VII.1:</b> Calcul des différents volumes.....                                         | 93 |
| <b>Tableau VII.2:</b> Le coût estimatif des travaux de terrassement. ....                        | 94 |
| <b>Tableau VII.3:</b> Estimation des coûts de mise en place des conduites. ....                  | 94 |
| <b>Tableau VII.4:</b> Estimation du coût des pièces spéciales.....                               | 95 |
| <b>Tableau VII.5:</b> Estimation du coût du bassin d'aspiration, des pompes de refoulement. .... | 96 |
| <b>Tableau VII.6:</b> Estimation du cout de forage.....                                          | 96 |
| <b>Tableau VII.6:</b> Le coût total du projet. ....                                              | 97 |

## Liste des figures :

### Chapitre I : Analyse des conditions naturelles

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1 :</b> Situation géographique de la wilaya de Khenchela. ....                                     | 4  |
| <b>Figure I.2 :</b> localisation de secteur A dans le périmètre tarrouma (source : google earth 2025)<br>..... | 4  |
| <b>Figure I.3 :</b> Histogramme de variation des précipitations moyennes mensuelle (mm).....                   | 6  |
| <b>Figure I.4 :</b> Histogramme des températures mensuelles (°C). ....                                         | 7  |
| <b>Figure I.5 :</b> Histogramme d'humidité relative de l'air (%). ....                                         | 8  |
| <b>Figure I.6 :</b> Diagramme bioclimatique d'Emberger (Station de Biskra) .....                               | 10 |
| <b>Figure I.7 :</b> Diagramme de Gaussen .....                                                                 | 11 |

### Chapitre II : Ressources en eau-Ressources en sol

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II.1 :</b> Carte des sols de la région d'étude .....                                                                              | 14 |
| <b>Figure II.2 :</b> Analyse texturale des sols étudiés .....                                                                               | 16 |
| <b>Figure II.3 :</b> Carte des réseaux hydrographiques de la wilaya de Khenchela (D'après<br>D.H.W.K) modifiée par Boubelli. S (2009) ..... | 18 |
| <b>Figure II.4 :</b> Carte des principales zones aquifères (D.H.W.K) modifiée par Boubelli.S (2009)<br>.....                                | 20 |
| <b>Figure II.5 :</b> Coupe hydrogéologique transversale du CT 5 (UNESCO, 1972).....                                                         | 20 |
| <b>Figure II.6 :</b> Carte piézométrique de la nappe du plio-quaternaire (CT) -EL-meita- (IFES,<br>2011).....                               | 21 |
| <b>Figure II.7 :</b> Carte des indices de la profondeur de la nappe d'El-Meita .....                                                        | 21 |
| <b>Figure II.8 :</b> Diagramme de classification des eaux d'irrigation .....                                                                | 25 |
| <b>Figure II.9 :</b> Ajustement des Précipitations moyennes annuelles aux lois normale et Log-<br>Normale .....                             | 29 |

### Chapitre IV : Etude de système d'adduction-distribution

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure IV.1.</b> Bilan économique total en fonction des diamètres étudiés..... | 55 |
| <b>Figure IV.2 :</b> Courbe caractéristique de la pompe .....                     | 56 |

### Chapitre V : Techniques d'irrigation

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure V.1 :</b> Irrigation à la raie.....          | 67 |
| <b>Figure V.2 :</b> Irrigation par submersion.....     | 68 |
| <b>Figure V.3 :</b> Irrigation localisée .....         | 69 |
| <b>Figure V.4 :</b> Irrigation par enrouleur .....     | 70 |
| <b>Figure V.5 :</b> Irrigation par rampe frontale..... | 70 |

### Introduction générale

Face aux défis liés au changement climatique, à la dégradation des ressources naturelles et à la croissance continue de la demande alimentaire mondiale, la gestion durable des ressources en eau destinées à l'irrigation s'impose désormais comme un enjeu stratégique majeur. En particulier dans les régions arides et semi-arides. Dans ces zones, l'agriculture reste un secteur vital, mais elle est fortement contrainte par la disponibilité limitée en ressources en eau.

L'Algérie, pays à climat semi-aride, est confrontée à la surexploitation des nappes phréatiques et une répartition inégale des ressources en eau.

Dans ce cas, il est urgent d'adopter de nouvelles techniques d'irrigation efficaces, capables de garantir une utilisation optimale de cette ressource vitale.

La région de Babar située dans le Sud de la wilaya de Khenchela, illustre bien cette problématique. Bien qu'elle dispose d'un potentiel foncier important, le développement agricole y reste limité en raison des contraintes hydriques et de l'absence d'infrastructures adaptées à l'irrigation.

Le périmètre de Tarrouma, constitue un exemple concret de zone nécessitant une intervention technique ciblée pour valoriser ses potentialités agricoles. Dans ce contexte, le présent mémoire décrit un projet d'aménagement hydro-agricole dans la wilaya de Khenchela, une démarche est engagée en vue de mobiliser les ressources en eau souterraines, la mise en place d'un réseau d'irrigation sous pression et l'optimisation des apports hydriques au niveau de la parcelle.

Cette étude vise à offrir une base d'évaluation pour la planification et la réalisation d'un projet durable et adapté aux conditions locales.

# **Chapitre I**

## **Analyse des conditions naturelles**

## Chapitre I : Analyse des conditions naturelles

### I.1 Introduction

Pour mettre en œuvre un aménagement hydro-agricole, il est essentiel en premier lieu d'analyser les conditions climatiques, cela permettra d'avoir une vision globale de la zone d'étude et de déterminer avec précision les besoins en eau des cultures dans notre périmètre. Au-delà des conditions climatiques, l'analyse des facteurs géographiques et hydrologiques s'avère indispensable pour appréhender leur impact sur le comportement des cultures ainsi que sur la conception et le fonctionnement des ouvrages hydrauliques. Ce chapitre vise donc à analyser les différentes caractéristiques climatiques, géographiques et géologiques de la zone d'étude afin de déterminer le choix des cultures.

### I.2 Présentation générale de la wilaya de khenchela

#### I.2.1 Situation géographique de la wilaya de Khenchela

La wilaya de Khenchela se situe dans le Nord-Est algérien et s'intègre dans la région des Aurès et se caractérise par un relief montagneux elle couvre sur une superficie de 9 811 km<sup>2</sup>, et comprend 21 communes et 08 daïra (Figure I.1).

Administrativement la wilaya est limitée par :

- Au Nord : par la wilaya d'Oum El Bouaghi,
- A l'Est : par la wilaya de Tébessa,
- Au Sud : par la wilaya de Biskra,
- A l'Ouest : par la wilaya de Batna. [1]

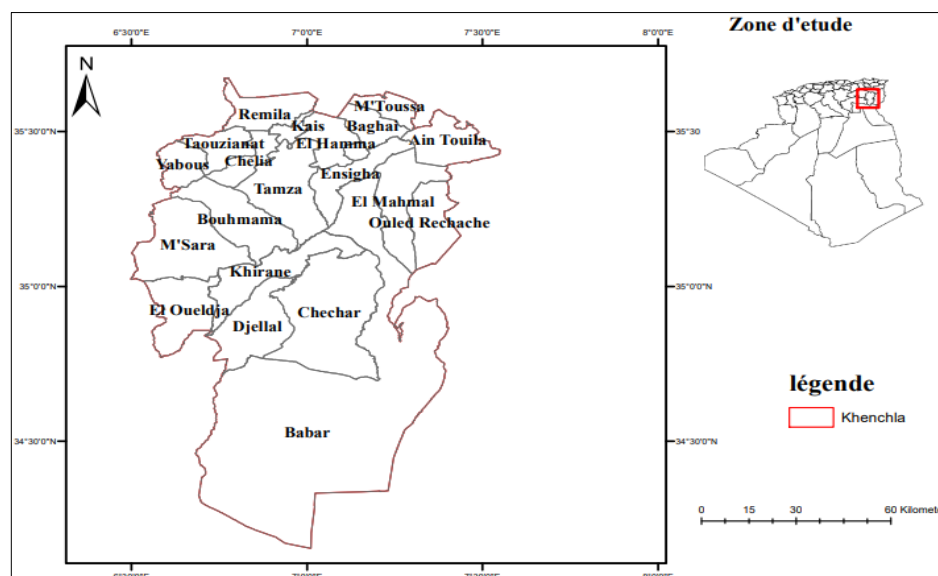


**Figure I.1 :** Situation géographique de la wilaya de Khenchela.

### **I.2.2 Présentation du périmètre d'étude**

Le périmètre de Tarrouma, faisant l'objet de notre mémoire, est situé dans le Sud de la commune de Babar, à l'extrême sud-ouest et à la frontière entre la wilaya de Khenchela et celle de Biskra. Le périmètre s'étend sur une superficie totale de 3 500 hectares il se situe à environ 125 km du chef-lieu de la commune et à 20 km de l'agglomération secondaire El Meita.[2]

Dans notre cas, on s'intéresse à l'aménagement du périmètre Tarrouma qui fait partie du secteur A sur une superficie de 150 ha.

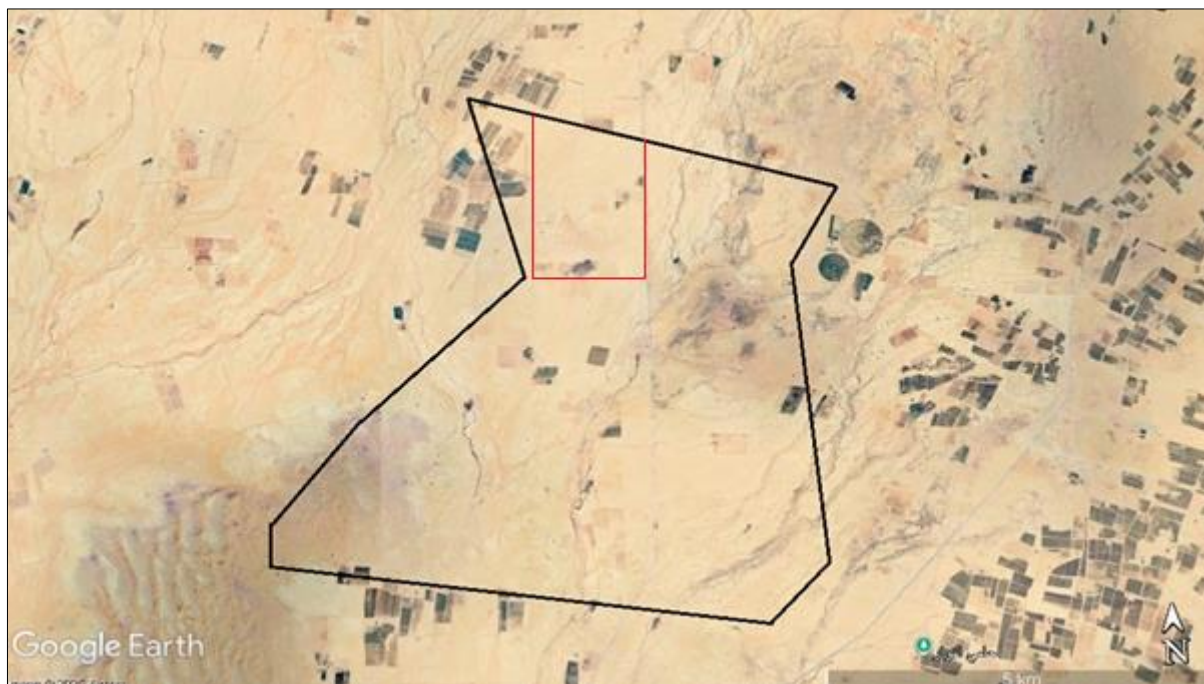


**Figure I.2 :** localisation de secteur A dans le périmètre tarrouma (source : google earth 2025)

### **I.3 Etude géologique**

La région de Khenchela, située dans l'Atlas Saharien, présente une géologie variée avec des formations allant du Paléozoïque au Cénozoïque. Dominée par des structures plissées et faillées, elle est composée principalement de calcaires, grès et marnes, témoignant des mouvements tectoniques passés. L'érosion et les dépôts quaternaires ont façonné son paysage, influençant les ressources en eau et la fertilité des sols.

### I.3.1 Les formations géologiques

La géologie de la région de Khenchela organisée par périodes géologiques :

**Le Mésozoïque (Crétacé) :** Cette période est dominée par des formations marneuses et marno-calcaires riches en gypse, elles se trouvent en grande partie recouvertes par des dépôts quaternaires et n'affleurent qu'en bordure des montagnes au sud du périmètre.

**Le Cénozoïque (Miocène) :** Elle est représentée par des formations constituées des grès quartzeux, des conglomérats, ainsi que des marnes rouges et blanches et qu'on trouve principalement dans les plaines entre les Oueds Roumane et Zériffa.

**Le Quaternaire :** qui est marqué par des dépôts alluviaux et des formations superficielles issues de l'érosion des reliefs environnants. Ces dépôts recouvrent une grande partie des plaines et des bassins hydrographiques de la région.[3]

### I.3.2 Géomorphologie/Relief

Le relief de la Wilaya de Khenchela est composé de quatre (04) grands ensembles géographiques.

**Les montagnes :** Situées au Nord-Ouest dans le massif des Aurès (Djebel Aidel, Chentgomma, Bezez) et à l'Est dans les massifs des Nememcha (Djebel Bouzendag, Sguiguine, Tedliste, Djahfa).

**Les plateaux :** Localisés au Nord-Est, notamment dans la région d'Ouled Rechache.

**Les plaines :** Présentes au Nord et Nord-Ouest, incluant Remila, Bouhmama et M'toussa, parfois appelées les hautes plaines.

**Les parcours steppiques et dépressions :** Situés au Sud, caractérisés par des terres sablonneuses et des chotts qui recueillent les eaux des oueds de la région.[4]

### I.4 Etude climatologique

Les facteurs climatologiques jouent un rôle essentiel dans la planification de l'irrigation, puisqu'ils influent directement sur les plantes, et conditionnent donc le bilan hydrologique et les besoins en eau des cultures, en particulier en zones arides.

Dans notre cas, l'analyse climatique repose sur les données de la station de Biskra, située à une distance de 50 km de notre périmètre d'étude, et qui reflète le caractère pédoclimatique de notre région. Ces données couvrent une période allant de 1995 à 2023, soit plus de trente ans d'observations. Elles ont été obtenues auprès l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH).

I.4.1 Choix de la Station météorologique

Dans notre étude, nous avons pris comme référence la station la plus proche du périmètre, à savoir la station de Zeribet El Oued, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Caractéristiques de la Station météorologique de Zeribet El Oued.

| Station         | Code   | Longitude | Latitude | Altitude (m) | Période D’observations | Durée des Observations |
|-----------------|--------|-----------|----------|--------------|------------------------|------------------------|
| Zeribet El Oued | 061901 | 6,3°E     | 34,4°N   | 44           | 1995-2023              | 29 ans                 |

I.4.2 Etude des précipitations :

L’étude des précipitations joue un rôle essentiel en irrigation, car elle permet d’évaluer le bilan hydrique nécessaire et de déterminer les doses et les besoins en eau des cultures pour chaque mois.

La répartition des pluies mensuelles est donnée dans le tableau I.2 :

Tableau I.2 : Moyennes mensuelle des précipitations (mm)

| Année    | Sept | Oct  | Nov  | Dec | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juill | Aout | Moy   |
|----------|------|------|------|-----|------|-----|------|-------|------|------|-------|------|-------|
| Moy (mm) | 28.1 | 22.6 | 27.7 | 5.1 | 14.0 | 9.9 | 18.8 | 18.3  | 19.2 | 11.5 | 0.5   | 5.5  | 181.1 |

(Source: ANRH 2024)

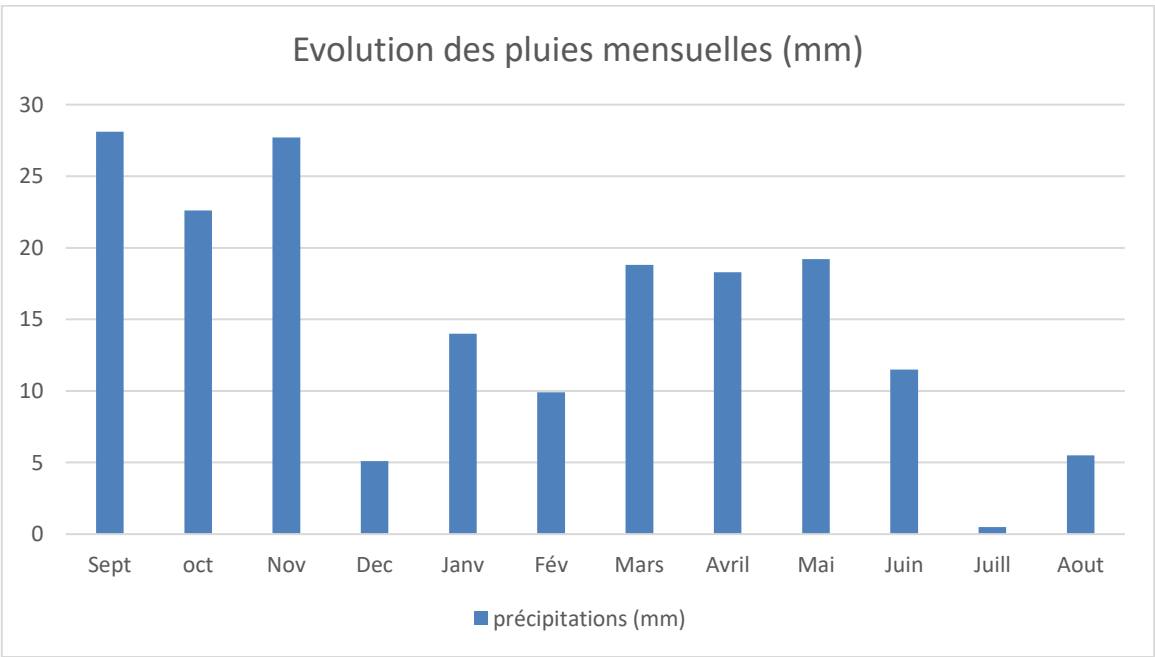


Figure I.3 : Histogramme de variation des précipitations moyennes mensuelle (mm)

D'après la figure I.3, on voit nettement que les pluies varient d'un mois à l'autre, le cumul annuel ne dépasse pas 200mm/an, ce qui indique que notre région est relativement aride.

### I.4.3 Températures

La température est un facteur essentiel en hydrologie et en irrigation, car elle influence l'évapotranspiration et la disponibilité de l'eau pour les cultures. Une température élevée entraîne une augmentation des besoins en irrigation en raison d'une évaporation plus intense.

Le tableau I.3 présente les valeurs moyennes, minimales et maximales des températures mensuelles sur la période étudiée.

**Tableau I.3 :** Températures mensuelles (°C) sur une période de 12ans (2010-2022)

| Année                 | Janv | Févr | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juill | Aout | Sept | Oct  | Nov  | Dec  | Moy  |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| $T_{\max}$ (C°)       | 22.8 | 24.9 | 29.9 | 34.8  | 39.4 | 44.4 | 46.7  | 44.7 | 41.0 | 35.3 | 28.3 | 22.8 | 34.6 |
| $T_{\min}$ (C°)       | 2.4  | 2.2  | 5.1  | 10.0  | 14.5 | 20.2 | 24.6  | 24.0 | 17.8 | 11.4 | 6.3  | 3.1  | 11.8 |
| $T_{\text{moy}}$ (C°) | 12.6 | 13.5 | 17.5 | 22.4  | 26.9 | 32.3 | 35.6  | 34.3 | 29.4 | 23.3 | 17.3 | 12.9 | 23.2 |

(Source: ONM Biskra)

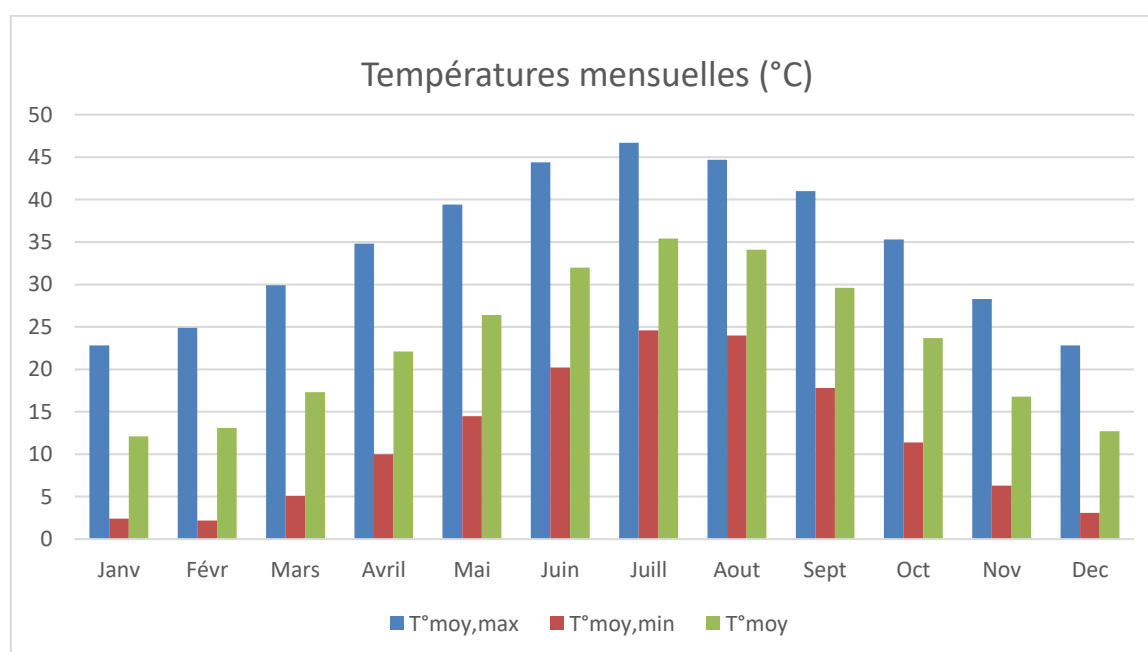


**Figure I.4 :** Histogramme des températures mensuelles (°C).

#### I.4.4 Humidité relative de l'air

L'humidité de l'air a un rôle important en hydrologie et en irrigation : une humidité élevée limite l'évaporation et le stress hydrique des plantes, tandis qu'une faible humidité accroît le déficit hydrique et les besoins en irrigation.

Les données moyennes de l'humidité de l'air sont données par le tableau I.4 :

**Tableau I.4 :** Moyennes d'Humidité relative de l'air (2012 à 2022).

| mois                | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juill | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Moy |
|---------------------|------|-----|------|-------|-----|------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| <b>Humidité (%)</b> | 54   | 46  | 40   | 41    | 45  | 40   | 38    | 38   | 40   | 45  | 55  | 59  | 45  |

(Source: ONM Biskra)

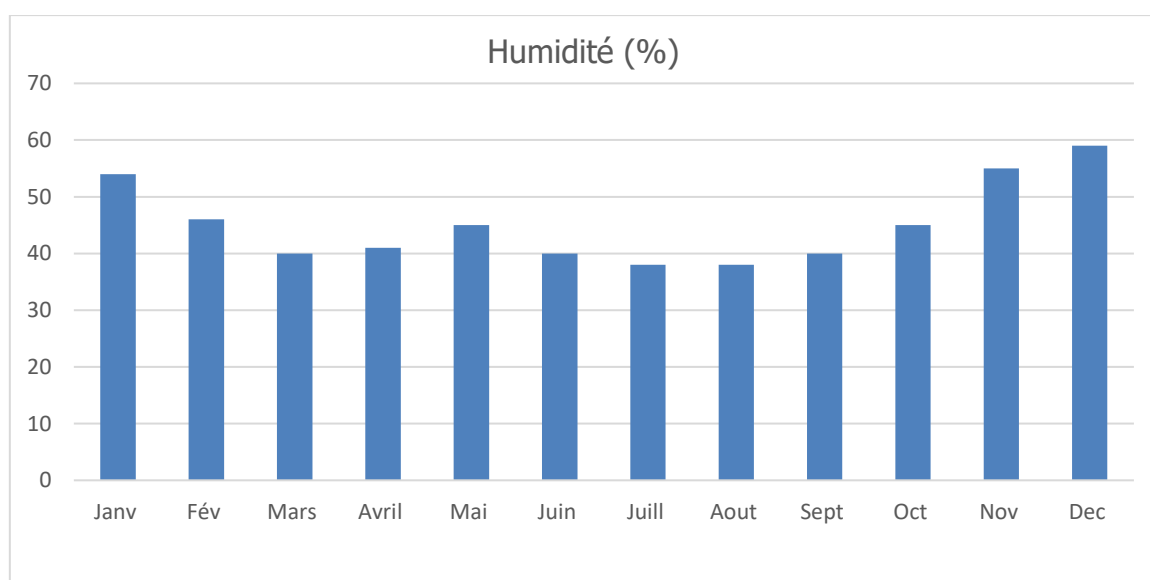


**Figure I.5 :** Histogramme d'humidité relative de l'air (%).

#### I.4.5 Les Vents

Les vents forts accélèrent l'évapotranspiration des plantes eau et ont une influence directe sur l'uniformité des arrosages.

Les données sont consignées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau I.5 :** Vitesse moyenne des vents (m/s) sur une période de 12ans (2012 à 2022).

| Année             | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai | Juin | Juill | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Moy |
|-------------------|------|-----|------|-------|-----|------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| <b>Vent (m/s)</b> | 3.0  | 3.2 | 2.3  | 2.5   | 2.9 | 3.1  | 3.2   | 3.0  | 3.5  | 2.3 | 3.3 | 2.4 | 2.9 |

(Source: ONM Biskra)

### I.4.6 L'insolation

L'insolation détermine l'évapotranspiration et les besoins en eau des plantes. Un fort ensoleillement augmente l'évaporation et la transpiration, nécessitant une irrigation plus importante. Le Tableau I.6 présente les durées moyennes mensuelles d'insolation.

**Tableau I.6 :** Valeurs moyennes des durées d'insolation mensuelles (du 2010 à 2022).

| Année               | Janv | Fév | Mars | Avril | Mai  | Juin | Juill | Aout | Sept | Oct | Nov | Dec | Moy |
|---------------------|------|-----|------|-------|------|------|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| Insolation (heures) | 7.4  | 8.6 | 9.5  | 10.8  | 11.0 | 11.8 | 11.3  | 11.0 | 10.4 | 9.2 | 8.0 | 7.3 | 9.7 |

## I.5 Calcul des indices Agro-météorologiques

Pour caractériser le climat et analyser l'influence de ses différents paramètres sur les plantes, deux facteurs essentiels entrent en jeu : la pluviométrie et la température. Ces éléments déterminent les conditions de croissance et d'adaptation des cultures.

### I.5.1 Quotient Ombrothermique d'Emberger

Cet indice a pour objectif de définir l'étage bioclimatique.

$$Q = \frac{2 \times 1000 \times P}{M^2 - m^2} \dots\dots\dots (I.1)$$

Avec :

- **Q** : Coefficient ombrothermique d'Emberger,
- **P** : Précipitations annuelles moyennes (mm),
- **M** : Moyenne des températures maximales (Kelvin),
- **m** : Moyenne des températures minimales (Kelvin).

D'où **Q= 13.8**

D'après le diagramme bioclimatique d'Emberger, et en se basant sur la valeur de Q ainsi que la température moyenne minimale du mois le plus froid (2.2°C), notre région est classée comme une zone **Sahrien**.

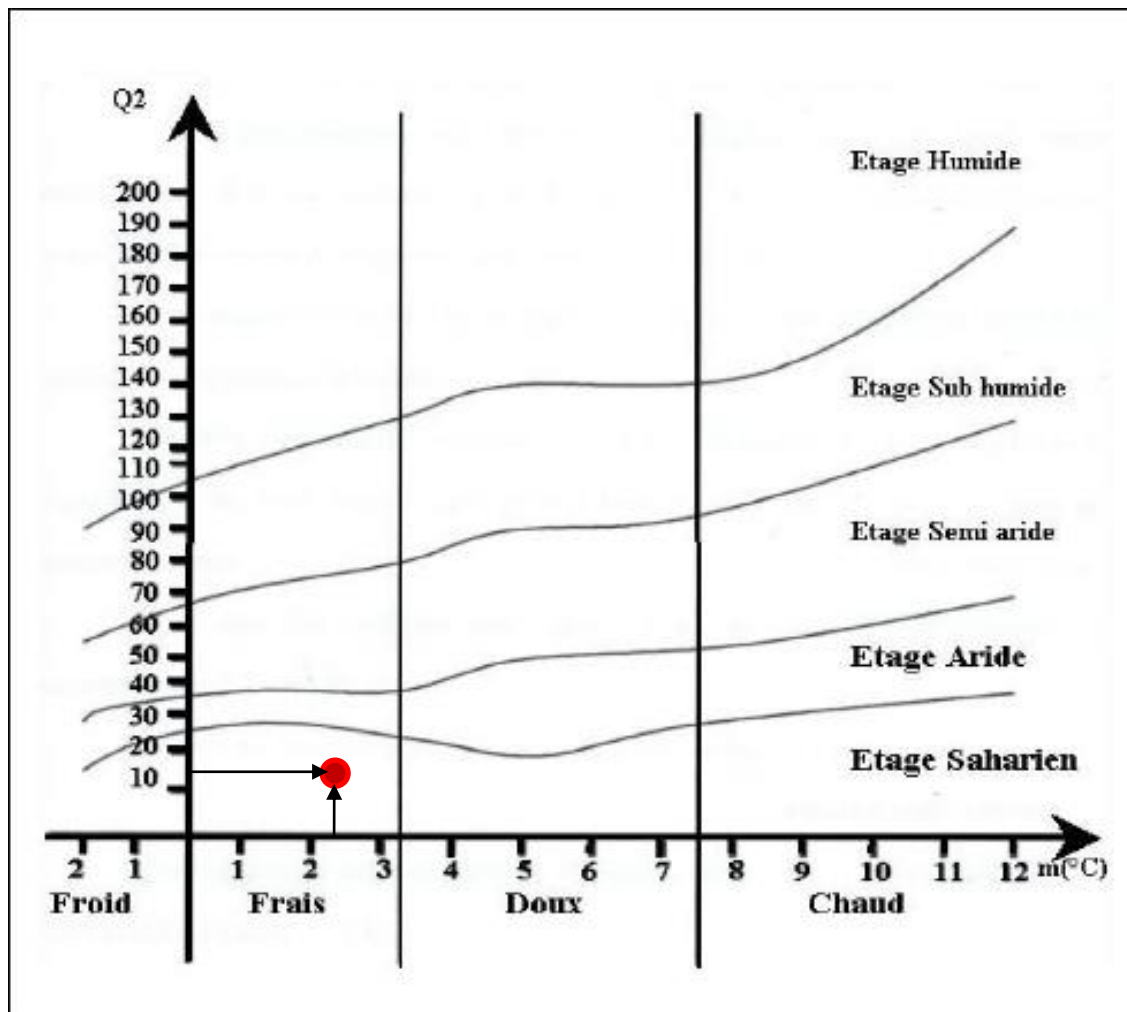


Figure I.6 : Diagramme bioclimatique d'Emberger (Station de Biskra)

### I.5.2 Diagramme Ombrothermique de Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen illustre la relation entre la température et les précipitations d'une région sur une année. Il utilise une échelle où la précipitation est représentée avec une échelle deux fois plus grande que celle de la température pour identifier les périodes sèches (courbe des températures au-dessus des précipitations) et humides (précipitations au-dessus des températures).

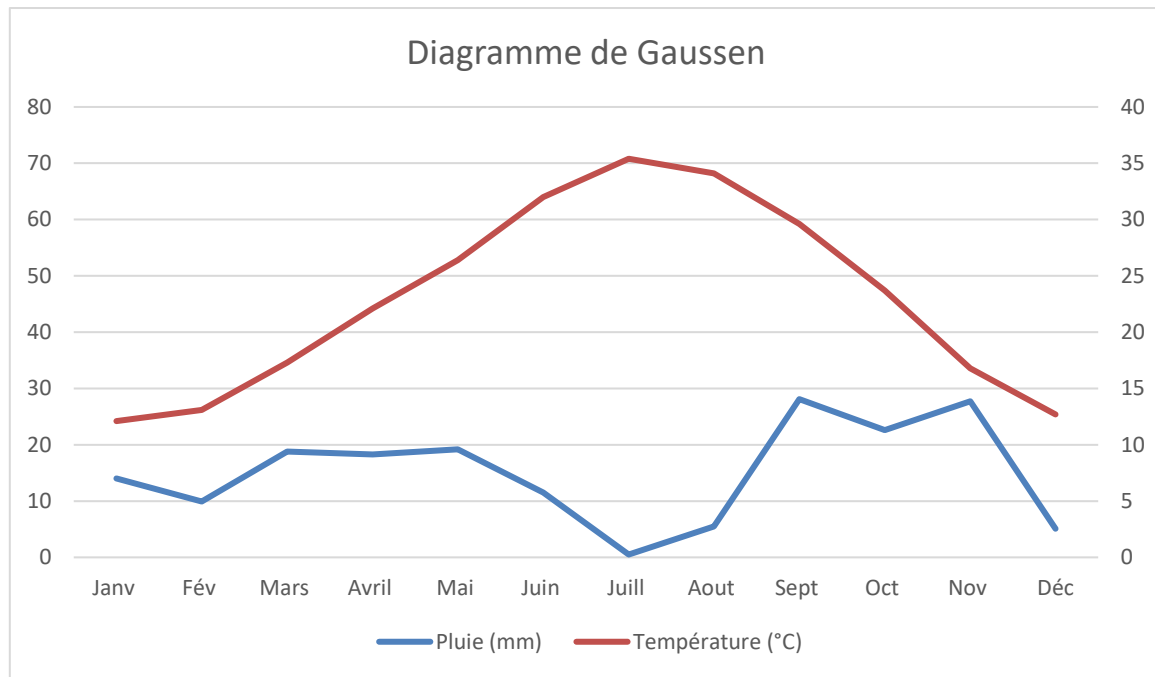


**Figure I.7 : Diagramme de Gaussen**

### Interprétation

Pour la station de Zeribet el oued (Biskra) qui est relativement proche du périmètre de Tarrouma, La région d'étude est relativement sèche toute l'année en raison des températures élevées et des précipitations très faibles.

### I.6 Etude socio-économique de la zone d'étude

La wilaya de Khenchela, possède un potentiel agricole important grâce à sa diversité de reliefs et de climats. Elle est connue pour son engagement dans la céréaliculture, l'oléiculture, et l'arboriculture fruitière, avec une expansion croissante des surfaces irriguées.

Superficie Agricole :

- Superficie agricole utile (SAU) : 257 426 ha,
- Superficie irriguée : 71 051 ha,
- Terres agricoles en repos : 115 794 ha,
- Population Active Agricole : 68 500 dont 7900 femmes. [7]

**Tableau I.7** : Principales Filières Agricoles de la wilaya de khenchela

| Filière                | Superficie (Ha) | Superficie Irriguée (Ha) | Production (Qx)                    |
|------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------------|
| Céréales               | 120 500         | 39 477                   | 1 720 000 (dont 578 298 collectés) |
| Maraîchage             | 20 271          | 12 713                   | 1 327 450                          |
| Légumes                | 4 836           | 4 836                    | 711 052                            |
| Arbres fruitiers       | 8 750           | 8 750                    | 1 635 000                          |
| Oléiculture (Oliviers) | 4 428           | 4 428                    | 95 981                             |
| Vignoble               | 35              | 35                       | 1 660                              |
| Palmier dattier        | 812             | 812                      | 181 100                            |

La commune de Babar, se distingue par son fort potentiel agricole, notamment en céréaliculture, avec un rendement moyen de 30 quintaux par hectare, atteignant parfois 60 quintaux. Cette performance est soutenue par des améliorations des infrastructures agricoles, comme le raccordement de 181 exploitations au réseau électrique en 2022 et l'électrification de 44 forages en cours pour optimiser l'irrigation. Ces initiatives reflètent le dynamisme agricole de la région et l'engagement des autorités locales à renforcer le secteur. [7]

## I.7 Conclusion

Le périmètre de Tarrouma, situé au sud de la commune de Babar dans la wilaya de Khenchela, s'étend sur une vaste zone agricole de 200 000 hectares, son climat est saharien, marqué par des températures élevées et de faibles précipitations (181.1 mm/an). Ces conditions accentuent la sécheresse et représentent un défi majeur pour tout aménagement hydro-agricole, et rendent l'irrigation essentielle pour garantir des rendements agricoles satisfaisants.

La céréaliculture, qui constitue un pilier économique de la région, dépend fortement d'une gestion efficace de l'eau et de l'adoption de techniques agricoles adaptées pour assurer une production durable, ceci malgré les contraintes climatiques.

# **Chapitre II**

**Ressources en sol- Ressources en  
eau**

## Chapitre II : Ressources en sol- Ressources en eau

### II.1 Introduction

Le sol constitue le support de toute production agricole, assurant la rétention de l'eau et des éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes. Sa structure et sa composition influencent directement le choix des cultures ainsi que l'efficacité de l'irrigation. Une bonne connaissance de ses caractéristiques, telles que la texture, la perméabilité et la capacité de rétention d'eau, permet d'optimiser les pratiques agricoles et d'adopter des techniques d'irrigation adaptées.

### II.2 Ressources en sol

#### II.2.1 Introduction

L'analyse des sols permet d'identifier les terres les plus adaptées à l'irrigation et à l'aménagement hydro-agricole, et de choisir les cultures du périmètre. En outre, elle évalue la fertilité des sols et les techniques d'irrigation adaptées ce qui assure une gestion durable des ressources en eau et en sols.

#### II.2.2 Classification des sols

La classification basée dans notre mémoire est celle de C.P.C.S, édition 1970, qui repose essentiellement sur la détermination des unités supérieures : classe, sous classe, groupe et sous-groupe, etc.

La prospection pédologique des profils étudiés à travers le périmètre, a permis d'identifier une seule classe de sol : **Classe de sols peu évolués.**

Au niveau du sous-groupe le sol est subdivisé en :

- Sol peu évolué d'apport éo-alluvial modal,
- Sol peu évolué d'apport éo-alluvial faiblement halomorphe. [2]

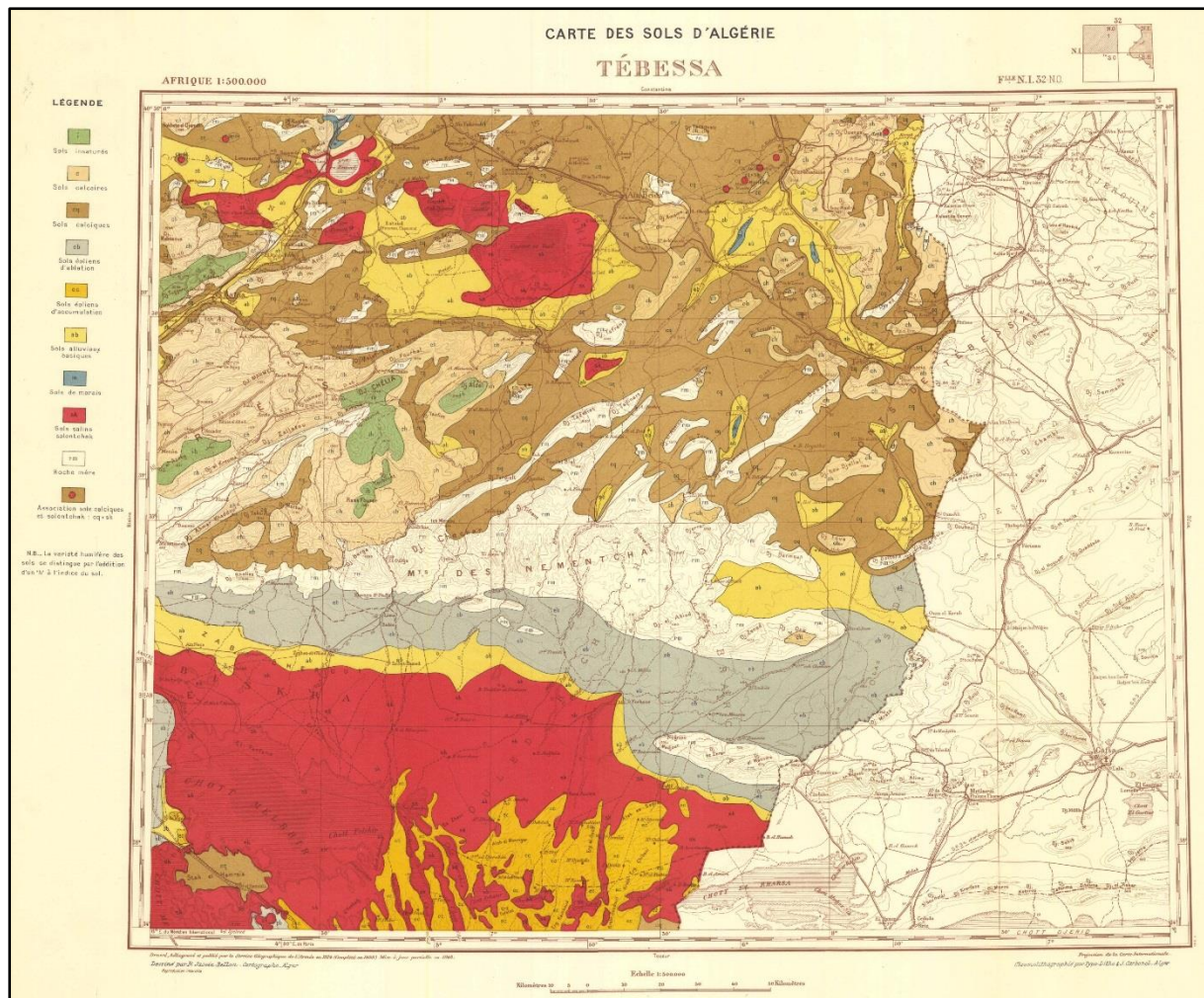


Figure II.1 : Carte des sols de la région d'étude

### II.2.3 Caractéristiques morphologiques

#### Profil N° 1 :

##### Description du Profil

- Classe : Sol peu évolués ;
- S/Classe : non climatique ;
- Groupe : d'apport éo-alluvial ;
- S/Groupe : modal ;
- Lithologie : alluvion fine
- Géomorphologie : plateau saharien
- Topographie : pente 0 - 3%
- Aspect de la surface parcours dégradée
- Occupation du sol : terrain nu,
- Érosion : hydrique

### Description des horizons

Les horizons sont catégorisés en fonction de leur profondeur comme suit :

**[0-20 cm]** : sec couleur brun 7.5YR 5/4 texture argilo-limoneuse, structure polyédrique fine, matière organique peu décelable, quelques racines, poreux friable, effervescence Hcl fort, calcaire diffus.

**[20-60 cm]** : sec couleur brun clair 7.5 YR 6/4 texture argilo-limoneuse, structure polyédrique fine, matière organique peu décelable, quelques racines, peu compacte, friable, effervescence Hcl fort, calcaire diffus.

**[60-110cm]** : sec couleur brun clair 7.5 YR 6/3 texture limono-argileuse, structure polyédrique, matière organique non décelable, pas racines, compacte, effervescence Hcl fort, calcaire diffus.

**[> 110 cm]** : dépôts alluvionnaires fins. [2]

### II.2.4 Analyse physico-chimique des sols

L'analyse physico-chimique réalisée en laboratoire a permis d'approfondir les caractéristiques du sol, en particulier sa texture et son comportement hydrodynamique. Les analyses physico-chimiques des sols sont résumées dans le tableau II.1 :

**Tableau II.1** : L'analyse des profils au laboratoire

| <b>Profil:</b>                             |                  | <b>1</b>    |              |            |
|--------------------------------------------|------------------|-------------|--------------|------------|
| Profondeurs (cm)                           |                  | 0-20 cm     | 20-60 cm     | 60-110cm   |
| PH eau                                     |                  | 8.0         | 7.8          | 7.9        |
| PH Kcl                                     |                  | 7.7         | 7.8          | 7.8        |
| Calcaire total (%)                         |                  | 40.34       | 45.20        | 36.60      |
| Calcaire actif (%)                         |                  | 8.10        | 9.19         | 11.20      |
| Carbone (%)                                |                  | 1.12        | 1.08         | 1.00       |
| Matière organique (%)                      |                  | 1.92        | 1.85         | 0.75       |
| Azote total (%)                            |                  | 0.21        | 0.32         | 0.11       |
| C/N                                        |                  | 5.33        | 3.37         | 9.09       |
| Phosphore (ppm)                            |                  | 2.98        | 4.86         | 3.45       |
| CEC (meq+/100 grs sol)                     |                  | 26.23       | 21.20        | 18.65      |
| Cations échangeables<br>(meq+/100 grs sol) | K+               | 0.0085      | 0.0045       | 0.0052     |
|                                            | Na+              | 13.82       | 13.69        | 15.20      |
|                                            | Ca <sup>++</sup> | 82.59+32.44 | 109.37+13.67 | 87.75+1.99 |
|                                            | Mg <sup>++</sup> |             |              |            |
| Conductivité électrique (dS/m)             |                  | 0.609       | 0.517        | 0.605      |
| Granulométrie (%)                          | A                | 53.83       | 41.19        | 36.43      |
|                                            | LF               | 40.19       | 52.10        | 58.17      |
|                                            | LG               | 3.01        | 2.01         | 1.16       |
|                                            | SF               | 1.09        | 01.50        | 3.00       |
|                                            | SG               | 00.50       | 01.50        | 00         |

### II.2.4.1 Interprétations des résultats

D'après les Analyse physico-chimiques des profils on voit que la texture est limoneux-argileuse, selon la projection du triangle de texture (USDA) elle offre une bonne rétention, on note une faible à modérée teneur en matière organique (1.51 % en moyenne).

La salinité reste faible. La texture limono-argileuse offre une bonne rétention d'eau. Pour optimiser la qualité du sol, il est recommandé d'apporter du compost, de gérer l'irrigation et d'adopter un travail du sol adapté afin d'améliorer l'infiltration et la stabilité structurale

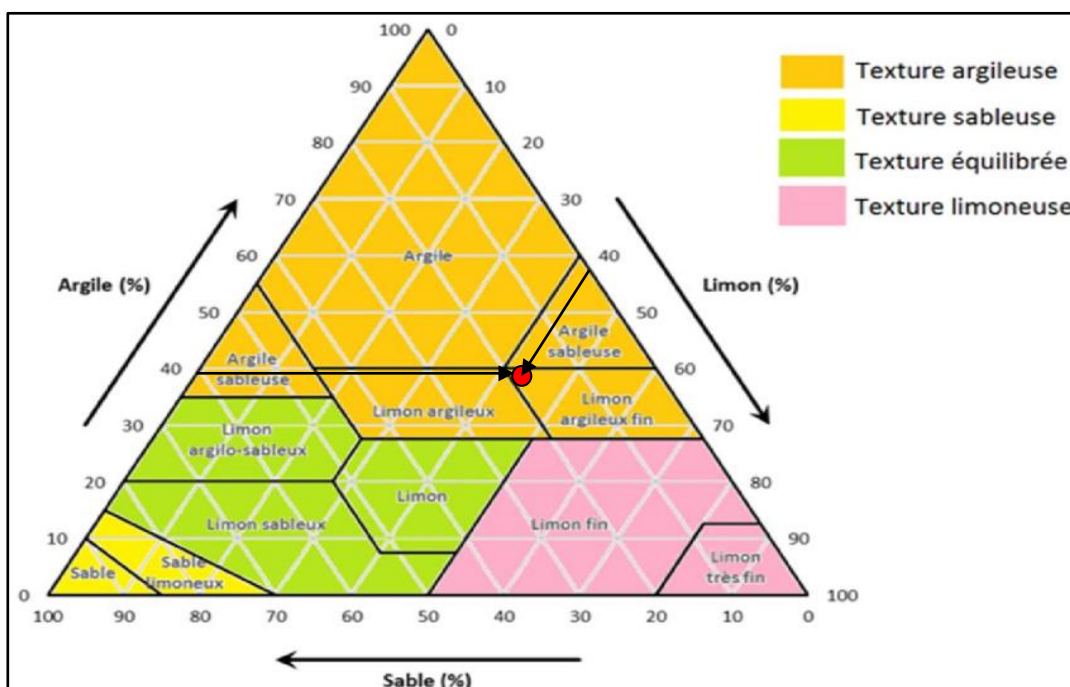


Figure II.2 : Analyse texturale des sols étudiés

Les propriétés hydrodynamiques sont résumées dans le tableau II.2

Tableau II.2 : Propriétés hydrodynamiques des sols

| Texture                    | limoneux argileuse |
|----------------------------|--------------------|
| Capacité au champ (%)      | 26-28%             |
| Point de flétrissement (%) | 14-15%             |
| Vitesse d'infiltration     | 15-20 mm/h         |
| Densité apparente          | 1.4                |

### II.2.4.2 Détermination des aptitudes culturelles des sols

L'aptitude culturelle d'un sol exprime sa capacité à satisfaire les exigences physiques, chimiques et biologiques indispensables à la croissance et à la productivité des plantes. Elle dépend de la nature du sol, des besoins spécifiques des cultures et des conditions climatiques, garantissant ainsi une exploitation optimale et durable des terres agricoles.

Les classes des aptitudes culturelles du périmètre d'étude sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau II.3 :** Les aptitudes culturelles associées à chaque zone

| Type de culture                            | Bons sols pour:                                                 | Sols moyens pour:                             |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Cultures arboricoles</b>                | Olivier, Amandier, Figuier                                      | Agrumes, Pommier sur franc, Poirier sur franc |
| <b>Cultures industrielles</b>              | Betterave à sucre, Coton, Tournesol                             | Lin                                           |
| <b>Cultures céréalières et fourragères</b> | Blé dur, Blé tendre, Orge, Ray-grass, Sorgho, Maïs              | Luzerne, Vesce-avoine                         |
| <b>Cultures maraîchères</b>                | Tomate, Oignon, Pomme de terre, Laitue, Ail, Haricot, Concombre | Carotte, Melon, Piment, Poivron               |

## II.3 Ressources en eau

Le périmètre de Tarrouma est situé dans une région aride où les ressources en eau superficielles ne sont pas mobilisables, cependant La zone d'étude est une zone agricole bénéficiant d'un potentiel aquifère important.

### II.3.1 Caractéristiques Hydrogéologiques de la zone d'étude

#### II.3.1.1 Réseaux hydrographiques :

La région est caractérisée par deux principaux drainages : au nord vers le Chott de Guerraet-Tarf et au sud vers le Chott Melghir. Le réseau hydrographique du nord est peu développé et a une influence limitée sur l'économie locale. En revanche, la partie sud possède un réseau plus important, structuré en trois bassins essentiels : le bassin d'Oued El-Ma, le bassin d'Oued El-Areb et le bassin de Oued Beni Barber, qui jouent un rôle majeur dans l'hydrologie régionale. [8]

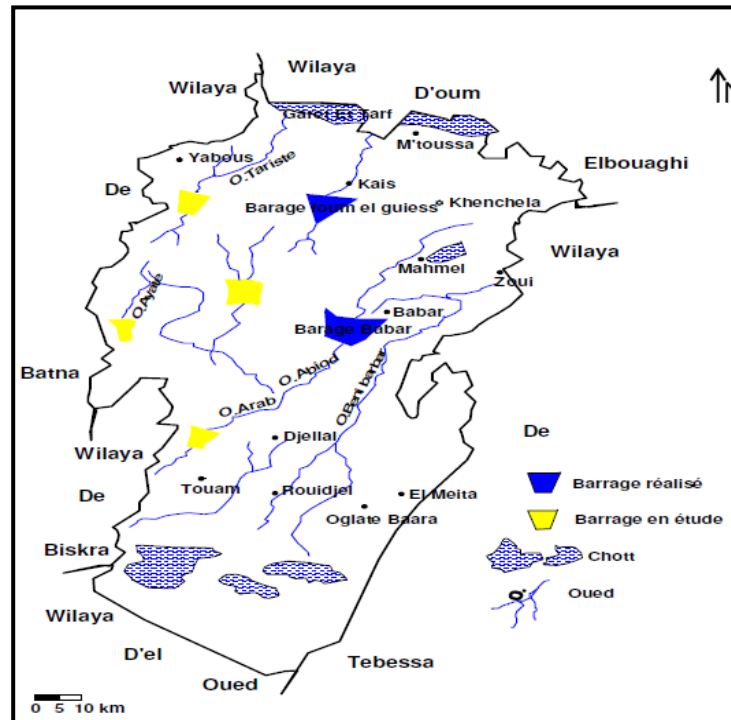


**Figure II.3 :** Carte des réseaux hydrographiques de la wilaya de Khenchela (D'après D.H.W.K) modifiée par Boubelli. S (2009)

### II.3.1.2 Définition de l'aquifère :

Un aquifère est une formation géologique contenant de l'eau souterraine, capable de la stocker et de la transmettre sous l'effet de la gravité. Sa capacité à retenir et à transmettre l'eau dépend de la nature des roches, de leur porosité et de leur perméabilité. [7]

### II.3.1.3 Définition du réservoir :

Le réservoir désigne la capacité de stockage de l'aquifère. Il est déterminé par :

- **La porosité** : le rapport entre le volume des vides et le volume total de la roche.
- **La perméabilité** : la capacité d'un matériau à laisser circuler l'eau à travers ses pores et fissures. [7]

### II.3.1.4 Les systèmes aquifères de la wilaya :

Trois principaux systèmes aquifères sont identifiés dans la région :

L'aquifère quaternaire (Quaternaire)

- **Nature géologique** : alluvions récentes composées de sables, graviers et limons.
- **Profondeur** : 5 – 30 m.
- **Qualité de l'eau** : vulnérable à la pollution, utilisée principalement pour l'agriculture.

L'aquifère crétacé (Crétacé)

- **Nature géologique** : constitué de calcaires, marnes et gypse,
- **Profondeur** : 150 – 250 m,
- **Qualité de l'eau** : relativement bonne mais pouvant contenir des sulfates et du fluor.

L'aquifère miocène (Miocène)

- **Nature géologique** : composé de grès quartzitiques, conglomérats et marnes,
- **Profondeur**: 100 – 200 m,
- **Qualité de l'eau** : intermédiaire entre le quaternaire et le crétacé, avec une minéralisation modérée. [7]

### II.3.1.5 Répartition des nappes aquifères à Khenchela

Dans la région de Khenchela, quatre nappes aquifères principales ont été recensées :

Nappe du Quaternaire et alluvions récentes

- **Profondeur** : 10 à 50 m,
- **Type** : Peu profonde, rapidement rechargée par les précipitations et les cours d'eau.

Nappe du Miocène des Grès

- **Profondeur** : 50 à 150 m,
- **Type** : Aquifère intermédiaire, constitué de grès perméables.

Nappe du Crétacé (Calcaires Maestrichtiens),

- **Profondeur** : 100 à 300 m.
- **Type** : Aquifère fissuré, recharge plus lente et dépendante des fractures géologiques.

Nappe du Complexe Terminal et Intercalaire

- **Profondeur** : 200 à 600 m
- **Type** : Aquifère profond, grande capacité de stockage mais exploitation plus coûteuse.

Le périmètre de Tarrouma est alimenté à partir de la nappe du Complexe Terminal, La piézométrie joue un rôle déterminant quant à la connaissance des écoulements souterrains, elle permet également de connaître et de fixer les conditions aux limites d'une nappe. [7]

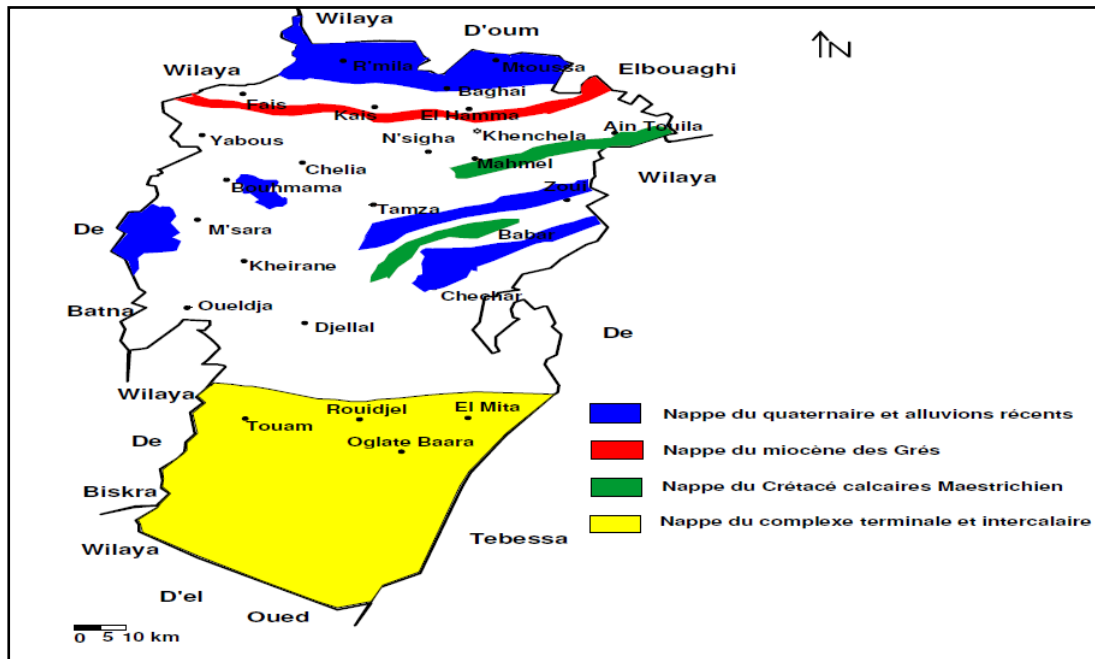


Figure II.4 : Carte des principales zones aquifères (D.H.W.K) modifiée par Boubelli.S (2009)

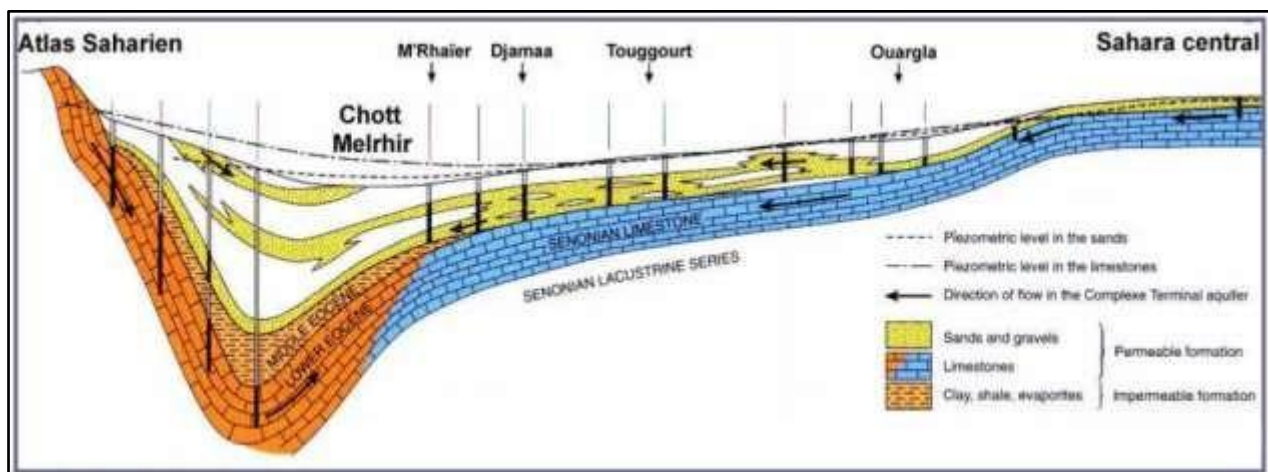


Figure II.5 : Coupe hydrogéologique transversale du CT 5 (UNESCO, 1972)

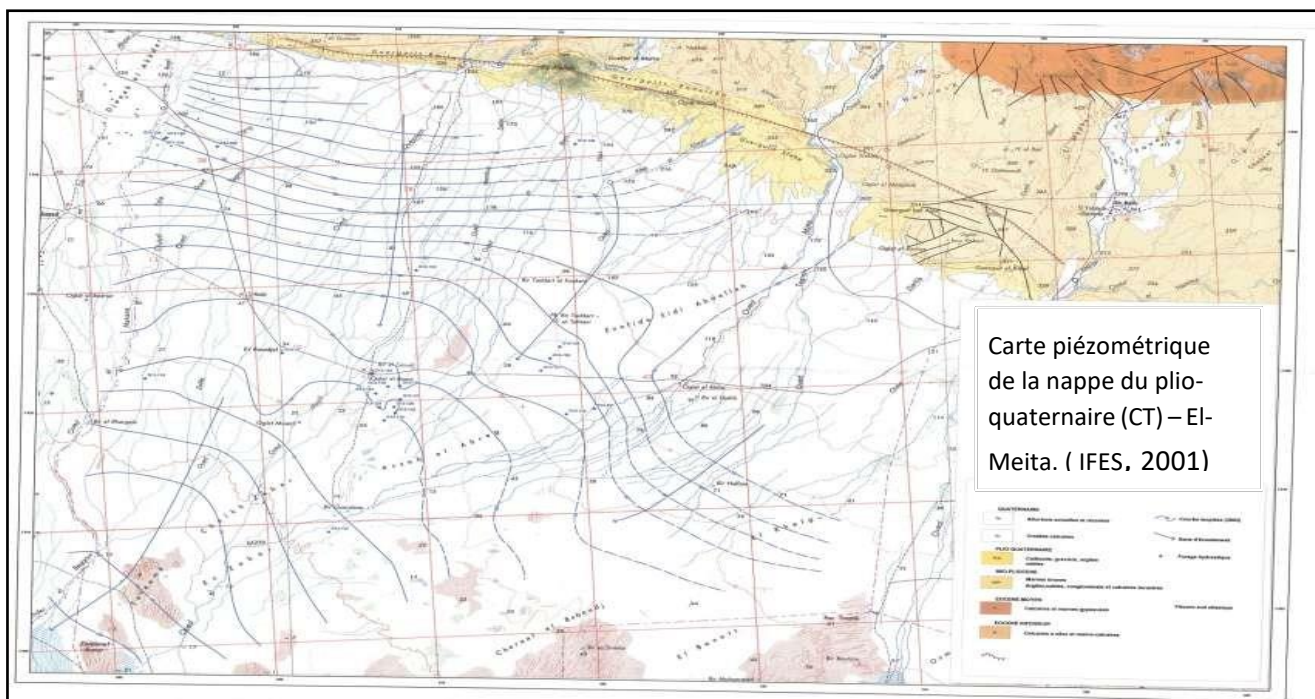


**Figure II.6 :** Carte piézométrique de la nappe du plio-quaternaire (CT) -EL-meita- (IFES, 2011)

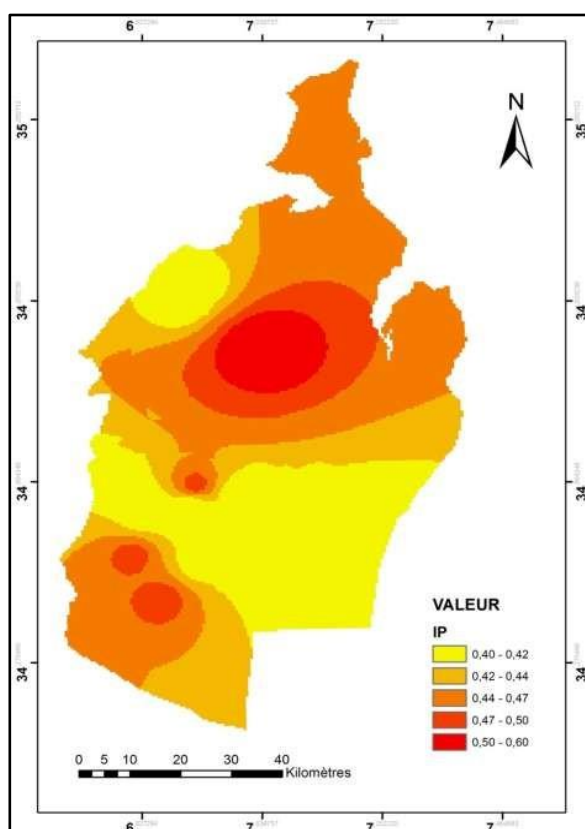


**Figure II.7 :** Carte des indices de la profondeur de la nappe d'El-Meita

### II.3.1.6 Caractéristiques des forages

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques techniques du forage utilisé pour l'alimentation en eau du périmètre.

**Tableau II.4** : caractéristiques des forages

| Forage | Altitude | Niveau statique (m) | Niveau dynamique (m) | Débit de forage (L/s) |
|--------|----------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| F      | 26       | Artésien            | -21                  | 23                    |

### II.3.1.7 Qualités de l'eau d'irrigation

Avant tout projet d'aménagement hydro-agricole, il est essentiel de s'assurer que l'eau destinée à l'irrigation est en quantité suffisante, mais aussi de bonne qualité. Une eau inadaptée peut entraîner des déséquilibres chimiques, réduire la fertilité du sol et nuire aux cultures. C'est pourquoi un diagnostic précis est nécessaire afin de détecter d'éventuels éléments dont l'excès pourrait être néfaste.

Les principaux paramètres à analyser pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation sont :

- **La salinité** : une concentration excessive en sels dissous peut causer des problèmes d'absorption de l'eau par les plantes et une dégradation des sols.
- **Le risque sodique (SAR - Sodium Adsorption Ratio)** : un excès de sodium par rapport aux autres cations peut altérer la structure du sol et réduire sa perméabilité.
- **Le pH** : un pH trop acide ou trop alcalin influence la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes.
- **Les éléments toxiques** : certaines substances comme le chlore, le bore ou les métaux lourds peuvent être toxiques pour les cultures à des concentrations élevées.

L'analyse de ces paramètres permet de choisir les techniques de traitement ou d'adaptation nécessaires afin d'optimiser l'utilisation de l'eau et de préserver la productivité des sols. [8]

**Tableau II.5 :** Caractéristique chimique de l'eau d'irrigation

| Paramètre          | Unité               | Valeur moyenne |
|--------------------|---------------------|----------------|
| Conductivité       | $\mu \text{ s/ cm}$ | 1950           |
| Résidu Sec         | mg/l                | 3788           |
| PH                 | -                   | 7,33           |
| $\text{Cl}^-$      | mg/l                | 225            |
| $\text{Na}^+$      | mg/l                | 325.2          |
| $\text{Ca}^{++}$   | mg/l                | 346.96         |
| $\text{Mg}^{++}$   | mg/l                | 91.8           |
| $\text{K}^+$       | mg/l                | 8              |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | mg/l                | 2500           |
| $\text{HCO}_3^-$   | mg/l                | 122            |
| $\text{NO}_3^-$    | mg/l                | 0              |

### II.3.1.8 Classification des eaux pour l'irrigation

La classification américaine des eaux d'irrigation repose sur l'évaluation de deux paramètres principaux :

- La concentration totale de sels solubles (conductivité électrique)
- Le SAR (Sodium Absorption Ratio)

### II.3.1.9 La Conductivité électrique (CE) :

La conductivité électrique (CE) est un indicateur clé pour mesurer la salinité de l'eau. Elle exprime la capacité de l'eau à conduire l'électricité, ce qui est directement lié à la quantité de sels dissous. Elle est mesurée en décisiemens par mètre (dS/m) ou en microsiemens par centimètre ( $\mu\text{S/cm}$ ). La classification du risque de salinité de l'eau d'irrigation est établie en fonction de sa conductivité électrique, permettant ainsi de distinguer quatre niveaux de danger. [8]

**Tableau II.6 :** Classification des eaux en fonction de la conductivité électrique

| Classe | Conductivité électrique<br>CE (mmhos/cm) | Qualité des eaux              | Cultures                                                          |
|--------|------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| C1     | $CE \geq 0.25$                           | Risque faible de salinité     | Pour toutes les cultures                                          |
| C2     | $0.25 \leq CE \leq 0.75$                 | Risque moyen de salinité      | Pour les plantes moyennement tolérantes.                          |
| C3     | $0.75 \leq CE \leq 2.25$                 | Risque élevé de salinité      | Ne convient qu'à des sols bien drainés et des plantes tolérantes. |
| C4     | $CE > 2.25$                              | Risque très élevé de salinité | Eau difficilement utilisable                                      |

**II.3.1.10 Le SAR (Sodium Absorption Ratio)**

Le SAR (Sodium Absorption Ratio) ou Taux d'Absorption du Sodium est un indice qui mesure la proportion de sodium ( $Na^+$ ) par rapport au calcium ( $Ca^{2+}$ ) et au magnésium ( $Mg^{2+}$ ) dans l'eau d'irrigation. Il est calculé par la formule :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \dots\dots\dots (II.2)$$

Le SAR est important pour évaluer l'impact du sodium sur le sol. Une eau avec un SAR élevé peut provoquer la dispersion des particules d'argile dans le sol, réduisant ainsi son infiltration et sa perméabilité, ce qui peut affecter la croissance des cultures. Il existe quatre niveaux de risque d'alcalinisation. [8]

**Tableau II.7 :** Risque d'alcalinisation en fonction du SAR

| Classe | SAR                | Danger d'alcalinisation |
|--------|--------------------|-------------------------|
| S1     | $SAR \leq 10$      | Risque faible           |
| S2     | $10 < SAR \leq 18$ | Risque moyen            |
| S3     | $18 < SAR \leq 26$ | Risque élevé            |
| S4     | $SAR > 26$         | Risque très élevé       |

Dans notre cas :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} = \frac{822 \text{ (mg/l)}}{\sqrt{\frac{346.96 \text{ (mg/l)} + 91.8 \text{ (mg/l)}}{2}}} = \frac{14.14 \text{ (méq/l)}}{\sqrt{\frac{17.35 \text{ (méq/l)} + 7.56 \text{ (méq/l)}}{2}}}$$

**SAR = 3.84**

Pour classer l'eau d'irrigation de notre forage, nous nous référons au diagramme de Riverside, établi par l'US Salinity Laboratory Staff en 1954.

Dans notre cas **SAR=3.84** et **CE= 1950  $\mu$ s/ cm**, la classe de l'eau est **C3S1**

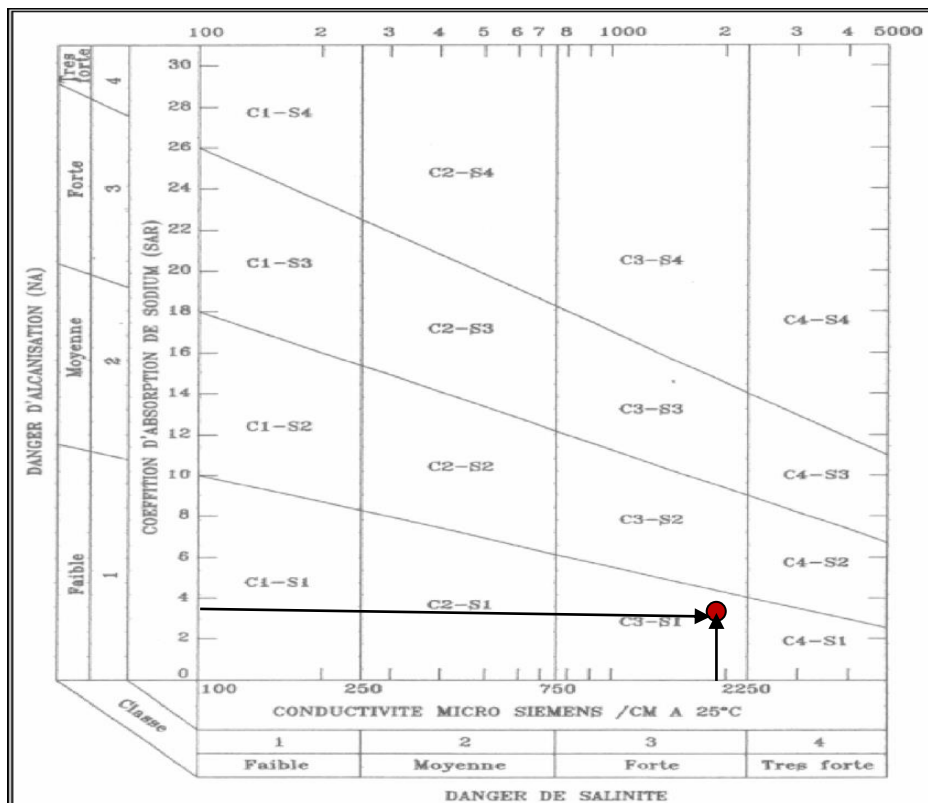


**Figure II.8 :** Diagramme de classification des eaux d'irrigation

## II.4 Calcul de la pluie de projet

L'analyse des précipitations vise à quantifier les pluies mensuelles de fréquence donnée qui seront introduites dans le calcul du bilan d'irrigation.

### II.4.1 Présentation de la station pluviométrique

Étant donné l'emplacement de notre périmètre d'étude, nous avons choisi la station de Zeribet El Oued comme station de référence, qui est gérée par l'ANRH. Ce choix s'explique par la durée des observations qui est relativement longue par rapport aux stations situées à proximité du périmètre.

Les données de cette station présentent les caractéristiques suivantes :

**Tableau II.8 : Station météorologique de Babar**

| Station         | Code   | Longitude | Latitude | Altitude (m) | Période D'observations | Durée des Observations |
|-----------------|--------|-----------|----------|--------------|------------------------|------------------------|
| Zeribet El Oued | 061901 | 6,3°E     | 34,4°N   | 44           | 1995-2023              | 29 ans                 |

Les pluies Moyennes mensuelles au niveau de la station de Zeribet El Oued sont présentées dans le tableau suivant (Tableau II.9) :

**Tableau II.9 : Précipitations moyennes mensuelles couvrant la période de 1995 à 2023**

| Année | Sept | Oct  | Nov  | Dec  | Jan  | Fev  | Mars | Avr  | Mai  | Juin | Juil | Aout | Ann   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1995  | 58.6 | 15.9 | 27.3 | 5.2  | 23.4 | 12.6 | 22.6 | 14.8 | 12.5 | 11   | 1.5  | 5.6  | 211   |
| 1996  | 17.1 | 10.9 | 18   | 4.7  | 17.3 | 7.6  | 10.8 | 22.8 | 12.6 | 9.9  | 2.1  | 6.2  | 140   |
| 1997  | 67.4 | 25   | 50.9 | 6.4  | 9.8  | 10.8 | 14   | 31.1 | 16.2 | 18.3 | 0    | 0    | 249.9 |
| 1998  | 25.5 | 27.2 | 28.3 | 0    | 33.4 | 7.6  | 10.7 | 6.9  | 14.8 | 17.5 | 2.3  | 6.1  | 180.3 |
| 1999  | 19.1 | 20.8 | 51.7 | 11.3 | 0    | 5.1  | 12.8 | 9    | 29.9 | 7.5  | 0    | 0    | 167.2 |
| 2000  | 19.4 | 22.3 | 15.5 | 4.2  | 30.2 | 0    | 9.7  | 7.1  | 20.4 | 4.8  | 1.3  | 4.1  | 139   |
| 2001  | 20.8 | 11.9 | 26.3 | 4.3  | 6.6  | 8.2  | 8.9  | 5.7  | 11.8 | 10.1 | 3    | 18.3 | 135.9 |
| 2002  | 12   | 16.9 | 47.2 | 5.8  | 36.4 | 10.1 | 31.1 | 27.8 | 19.1 | 8.9  | 0    | 0    | 215.3 |
| 2003  | 18.1 | 32.2 | 24.1 | 11.4 | 14.2 | 10.3 | 27.8 | 22.1 | 20.9 | 23.8 | 0    | 5.8  | 210.7 |
| 2004  | 23   | 21.3 | 63.6 | 18.1 | 0    | 8.9  | 17.2 | 12.9 | 9.9  | 14.4 | 1.8  | 5.4  | 196.5 |
| 2005  | 20.7 | 15.2 | 19.2 | 5.2  | 31.3 | 16.7 | 6    | 27.2 | 21.9 | 13.3 | 1.7  | 4.5  | 182.9 |
| 2006  | 24.6 | 17.5 | 26.5 | 11.6 | 10.1 | 11   | 28.3 | 29.3 | 12.5 | 2.9  | 0    | 5.2  | 179   |
| 2007  | 52.9 | 17.3 | 15.4 | 2.5  | 6.7  | 5.2  | 17.2 | 11   | 23   | 10.9 | 0    | 6.8  | 168.9 |
| 2008  | 38.7 | 29.8 | 20.3 | 11.3 | 58.3 | 8.3  | 18.2 | 17.5 | 19.3 | 7.3  | 0    | 4.3  | 233.3 |
| 2009  | 59.9 | 14.5 | 13   | 4    | 24.4 | 10.7 | 21.1 | 23.6 | 18.1 | 18.7 | 0    | 4.5  | 212.5 |
| 2010  | 16   | 21.8 | 35.4 | 4    | 3    | 13.4 | 27.1 | 22.9 | 27.5 | 14.9 | 0    | 6.1  | 192.1 |
| 2011  | 22.4 | 53   | 13.8 | 3.1  | 13.5 | 11.1 | 21.3 | 15.7 | 11   | 6.1  | 0    | 0    | 171   |
| 2012  | 12.8 | 20.4 | 29.4 | 2.6  | 15.2 | 11.1 | 20.4 | 22.1 | 14.3 | 14.2 | 0    | 13.4 | 175.9 |
| 2013  | 40.5 | 32.6 | 26.7 | 6.7  | 6.8  | 11   | 34   | 9.5  | 20.1 | 14.3 | 0    | 0    | 202.2 |
| 2014  | 30.4 | 17.6 | 21.7 | 0    | 15.9 | 21.2 | 15.4 | 8.9  | 12.2 | 10.7 | 0    | 17.6 | 171.6 |
| 2015  | 22.4 | 37.2 | 21.1 | 2.3  | 8.4  | 11   | 18   | 30.1 | 22.9 | 9.4  | 0    | 3.7  | 186.5 |
| 2016  | 33.8 | 11.8 | 28.4 | 0    | 5.1  | 8.4  | 12.3 | 33   | 11.3 | 12.8 | 0    | 3.3  | 160.2 |
| 2017  | 28.1 | 18.2 | 36   | 3.8  | 7.3  | 10.3 | 20.6 | 19.6 | 34.7 | 8.1  | 0    | 7.3  | 194   |

|             |      |      |      |     |      |      |      |      |      |      |     |     |       |
|-------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-------|
| <b>2018</b> | 15.6 | 48.6 | 16.6 | 0.9 | 7.5  | 9.4  | 35.6 | 21.4 | 30.4 | 6.3  | 0   | 9.9 | 202.2 |
| <b>2019</b> | 28.9 | 23.4 | 34.9 | 4.3 | 5.2  | 0    | 26.7 | 14.4 | 22.6 | 8    | 0.5 | 0   | 168.9 |
| <b>2020</b> | 29.5 | 22.3 | 15.9 | 5.5 | 4.1  | 10.4 | 15.3 | 17.3 | 22.5 | 16   | 0   | 4.9 | 163.7 |
| <b>2021</b> | 24.2 | 19.9 | 25.9 | 0   | 0    | 10.8 | 23.2 | 18.1 | 16.3 | 6.5  | 0   | 8.2 | 153.1 |
| <b>2022</b> | 20.7 | 19.5 | 17.5 | 4.1 | 4.9  | 11.2 | 8.2  | 9.2  | 29.8 | 17.4 | 0   | 0   | 142.5 |
| <b>2023</b> | 13.1 | 10   | 31.6 | 4.2 | 5.6  | 14.1 | 11.5 | 19   | 17.9 | 8.9  | 0   | 8.9 | 144.8 |
| <b>Moy</b>  | 28.1 | 22.6 | 27.7 | 5.1 | 14.0 | 9.9  | 18.8 | 18.3 | 19.2 | 11.5 | 0.5 | 5.5 | 181.1 |

(Source: ANRH 2024)

Les paramètres statistiques de la série sont détaillés comme suit :

**Tableau II.10** : Paramètres de la série pluviométrique

|                        |         |
|------------------------|---------|
| <b>Moyenne</b>         | 181.1   |
| <b>Ecart type</b>      | 28.897  |
| <b>Cv</b>              | 0.15957 |
| <b>P<sub>min</sub></b> | 135.9   |
| <b>P<sub>max</sub></b> | 249.9   |
| <b>Médiane</b>         | 179     |

#### II.4.2 Analyse de l'homogénéité des données pluviométriques :

L'étude de l'homogénéité de la série pluviométrique permet de vérifier si les données sont cohérentes et comparables dans le temps, sans discontinuités, cela garantit la fiabilité des analyses climatiques et hydrologiques basées sur ces données. Dans le cadre de notre étude, cette vérification est effectuée à l'aide du test de Mood, un outil essentiel pour évaluer la cohérence de la série pluviométrique. [9]

##### II.4.2.1 Test de Mood

Dans le cadre de notre étude, nous utilisons le test de Mood, un outil indispensable pour vérifier la cohérence de la série pluviométrique.

Afin de réaliser cette vérification, la série des valeurs non classées est remplacée par une suite de signes :

- "+" si  $x_i > M$  (valeur supérieure à la médiane M)
- "-" si  $x_i < M$  (valeur inférieure à la médiane M)

Ensuite, nous calculons :

- **Ns** : Nombre total de séries de "+" ou de "-" (c'est-à-dire les séquences consécutives d'un même signe).
- **Ts** : Taille de la plus grande série de "+" ou de "-".[9]

Conditions du test si qu'il repose sur les critères suivants :

$$\frac{1}{2} (N+1 - 1.96\sqrt{N-1}) < Ns < \frac{1}{2} (N+1 + 1.96\sqrt{N-1}) \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

$$Ts < 3.3 (\log_{10} N + 1) \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

**Tableau II.11** : Résultat du test Mood

|                        |            |            |              |              |              |            |              |              |              |              |
|------------------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P<sub>moy</sub></b> | <b>211</b> | <b>140</b> | <b>249.9</b> | <b>180.3</b> | <b>167.2</b> | <b>139</b> | <b>135.9</b> | <b>215.3</b> | <b>210.7</b> | <b>196.5</b> |
| <b>Signes</b>          | +          | -          | +            | +            | -            | -          | -            | +            | +            | +            |
| <b>P<sub>moy</sub></b> | 182.9      | 179        | 168.9        | 233.3        | 212.5        | 192.1      | 171          | 175.9        | 202.2        | 171.6        |
| <b>Signes</b>          | +          | -          | -            | +            | +            | +          | -            | -            | +            | -            |
| <b>P<sub>moy</sub></b> | 186.5      | 160.2      | 194          | 202.2        | 168.9        | 163.7      | 153.1        | 142.5        | 144.8        |              |
| <b>Signes</b>          | +          | -          | +            | +            | -            | -          | -            | -            | -            |              |

D'après le tableau on a : Nombre total de séquences (Ns) = 14

Taille de la plus grande série consécutive (Ts) = 5

$$9.81 < NS < 20.18$$

$$Ts < 8.13$$

Les deux conditions étant satisfaites, nous pouvons conclure que la série est homogène.

### II.4.3 Ajustement des pluies annuelles

Dans le cas des pluies moyennes annuelles, les lois d'ajustement les plus couramment utilisées pour modéliser la distribution des précipitations sont :

Loi Normale (de Gauss) : la formule mathématique de cette loi est la suivante : [9]

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

Avec :

u= variable réduite de Gauss égale à :

$$u = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

Loi Log-Normale : La formule de la loi est la suivante :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{\frac{-u^2}{2}} \dots\dots\dots (II.7)$$

Avec :

$$u = \log(x) \dots\dots\dots (II.8)$$

Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel HYFRAN.

#### II.4.3.1 Test de validité d'un ajustement :

Après ajustement des données selon les lois établies, il est essentiel d'évaluer leur adéquation afin de déterminer le meilleur ajustement.

Dans notre cas, nous avons utilisé le test du Khi-carrée ( $\chi^2$ ). Une loi est considérée comme adéquate si et seulement si :

$$\chi^2_{\text{calculé}} < \chi^2_{\text{théorique}}.$$

Avec un seuil d'erreur de  $\alpha=5\%$ . [9]

**Tableau II.12** : Test de validité des deux ajustements

| Loi normale                       | Loi log-normale                |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| $\chi^2_{\text{calculé}}=0.69$    | $\chi^2_{\text{calculé}}=2.62$ |
| Degrés de liberté =4              |                                |
| $\chi^2_{\text{théorique}}=9.488$ |                                |

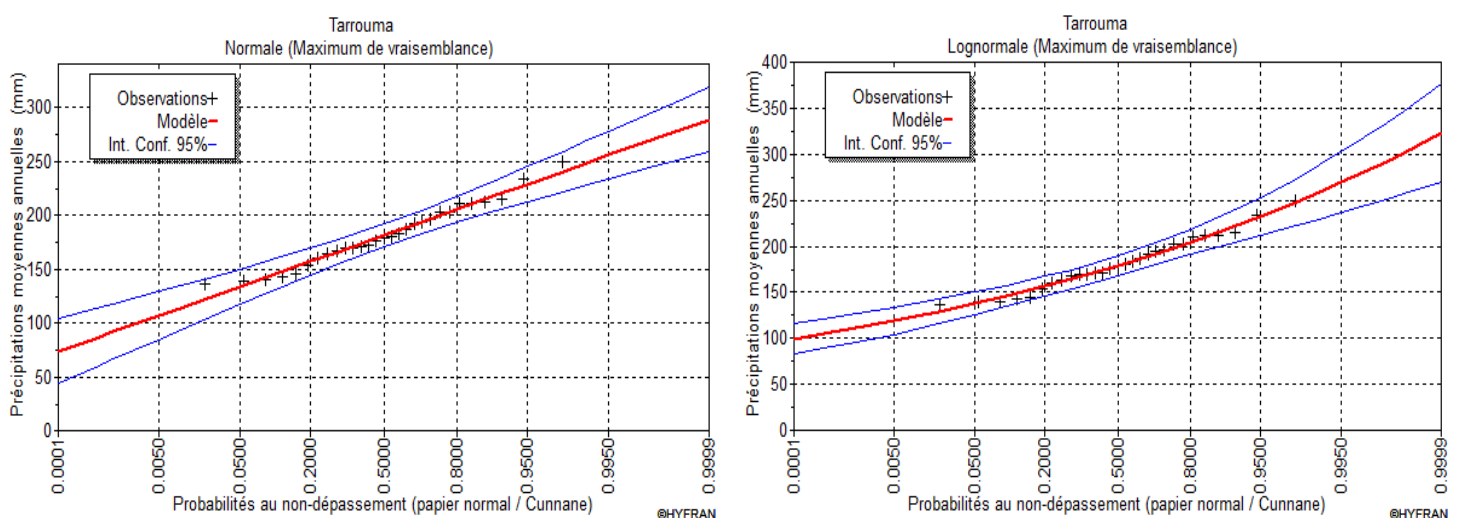


**Figure II.9** : Ajustement des Précipitations moyennes annuelles aux lois normale et Log-Normale

La loi normale s'avère être la plus adaptée à notre série de données.

**II.4.6. Détermination de l'année de calcul :**

Puisque la loi normale offre le meilleur ajustement, elle sera utilisée pour estimer la pluviométrie moyenne mensuelle représentative de la région.

**Tableau II.13 :** Résultat de l'ajustement

| T    | q   | Xt     | Intervalle de Confiance |
|------|-----|--------|-------------------------|
| 2    | 0.5 | 181.07 | 170.55 - 191.59         |
| 1.25 | 0.2 | 156.76 | 144.46 - 169.05         |

Les pluies mensuelles de fréquence 80 % sont calculées comme suit :

$$P_{\text{moy}80\%} = P_{\text{moy}} * \frac{P_{\text{théorique}(80\%) \text{ annuelle}}}{P_{\text{théorique}(50\%) \text{ annuelle}}} \dots\dots\dots (\text{II.9})$$

Donc :

$$P_{\text{moy}80\%} = P_{\text{moy}} * 0.86$$

**Tableau II.14 :** Calcul des pluies mensuelles pour l'année sèche (freq= 80%)

| Mois                                    | Sep  | Oct  | Nov  | Dec | Jan  | Fev | Mars | Avr  | Mai  | Juin | Juil | Aout |
|-----------------------------------------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| <b>P<sub>moy</sub><br/>(mm/mois)</b>    | 28.1 | 22.6 | 27.7 | 5.1 | 14.0 | 9.9 | 18.8 | 18.3 | 19.2 | 11.5 | 0.5  | 5.5  |
| <b>P<sub>moy80%</sub><br/>(mm/mois)</b> | 24.2 | 19.4 | 23.8 | 4.4 | 12.0 | 8.5 | 16.2 | 15.7 | 16.5 | 9.9  | 0.4  | 4.7  |

**II.5 Conclusion**

La caractérisation des ressources en sol et en eau est essentielle pour une gestion efficace du périmètre de Tarrouma.

L'analyse pédologique a révélé la présence des sols peu évolués, avec des propriétés physico-chimiques relativement adéquates influençant directement leur aptitude culturale et leur capacité à retenir l'eau.

Pour ce qui est des ressources en eau, l'étude hydrologique a permis de mettre en évidence l'insuffisance des pluies et leur irrégularité, et vu l'absence de ressources en eau superficielles, le périmètre sera alimenté par des forages situés à proximité de la zone d'étude, leur qualité est bonne avec une salinité moyenne.

# **Chapitre III**

## **Besoins en eau du Périmètre**

## Chapitre III : Besoins en eau du Périmètre

### III.1 Introduction

La gestion efficace de l'eau en agriculture repose sur une compréhension approfondie des besoins en eau des cultures. Dans un périmètre irrigué, cette connaissance est indispensable pour optimiser l'usage des ressources en eau et garantir la durabilité des aménagements hydro-agricoles.

Ce chapitre vise à quantifier le volume total d'eau nécessaire aux cultures en intégrant divers facteurs déterminants : conditions climatiques, propriétés du sol et qualité de l'eau d'irrigation. En s'appuyant sur les données analysées précédemment, nous établirons une assise pour une gestion rationnelle de l'irrigation, conciliant performance agricole et préservation des ressources hydriques.

### III.2 Besoin en eau du périmètre

L'évaluation des besoins en eau d'un périmètre irrigué permet de déterminer le volume nécessaire en fonction du climat, du sol et de l'efficacité du système d'irrigation. Une gestion optimisée garantit une utilisation rationnelle de l'eau, favorisant la croissance des cultures et la durabilité de l'agriculture.

#### III.2.1 Calcul des besoins en eau d'irrigation

Le calcul des besoins en irrigation pour une culture repose sur le bilan hydrique suivant :

$$B_i = ETM - (P_{eff} + RS) \dots\dots\dots(III.1)$$

Avec :

- **ETM** : Évapotranspiration maximale, représentant les besoins en eau de la culture (exprimée en mm). Elle est déterminée par la relation :

$$ETM = ET_0 \times K_c \dots\dots\dots(III.2)$$

- **K<sub>c</sub>** : le coefficient cultural qui dépend de la culture considérée,
- **P<sub>eff</sub>** : Pluie efficace, correspondant à la fraction des précipitations réellement utilisable par la plante,
- **Rs** : Réserve utile du sol, soit la quantité d'eau retenue dans le sol et disponible pour les racines. [10]

### III.3 Calcul de l'évapotranspiration référence (ET<sub>0</sub>) :

L'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>) correspond à la quantité d'eau évaporée et transpirée par une surface végétale standard. Elle est définie comme l'évapotranspiration maximale d'un gazon ras, en pleine croissance, couvrant intégralement le sol, bien alimenté en eau et situé dans une parcelle suffisamment vaste pour éviter les effets de bordure.

Il existe diverses méthodes pour calculer l'évapotranspiration de référence, classées en deux catégories principales :

Les méthodes directes mesurent physiquement l'évapotranspiration en conditions réelles :

- **Cuve lysimétrique** : permet d'évaluer précisément les pertes en eau par évapotranspiration en mesurant l'eau consommée par une culture dans un récipient de sol.
- **Bac évaporant** : mesure l'évaporation d'un plan d'eau exposé aux conditions climatiques, bien que cette méthode ne prenne pas en compte la transpiration des plantes.

Les méthodes indirectes : estiment l'ET<sub>0</sub> à partir de paramètres climatiques à l'aide de formules empiriques.

Dans la littérature hydrologique plusieurs formules plus ou moins complexes ont été élaborées, parmi elles nous pouvons citer :

- Blaney-Criddle (utilise température et ensoleillement),
- Thornthwaite (utilise uniquement la température),
- Hargreaves (intègre température et radiation solaire),
- Priestley-Taylor (rayonnement et humidité),
- Makkink-Turc (modèle simplifié basé sur l'énergie solaire),
- Penman-Monteith qui est la formule de Penman modifiée.

Dans notre étude, l'évapotranspiration de référence a été estimée en utilisant la méthode la plus couramment employée et recommandée, à savoir la méthode de Penman-Monteith modifiée.

- **Formule Modifiée de Penman\_Monteith**

La méthode de Penman-Monteith modifiée, recommandée par la FAO, estime l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>) en intégrant température, humidité, rayonnement solaire et vent, assurant une évaluation précise des besoins en eau des cultures, détaillée comme suit :

$$ET_0 = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{C_{ste}}{T + 273} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \times U_2)} \dots\dots\dots (III.3)$$

Avec

- **ET<sub>0</sub>** : Évapotranspiration de référence (mm/jour),
- **R<sub>n</sub>** : Rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m<sup>2</sup>/jour),
- **G** : Flux de chaleur dans le sol (MJ/m<sup>2</sup>/jour),
- **T** : Température moyenne journalière de l'air à 2 m (°C),
- **u<sub>2</sub>** : Vitesse du vent à 2 m (m/s),
- **e<sub>s</sub>** : Pression de vapeur saturante (kPa),
- **e<sub>a</sub>** : Pression de vapeur réelle (kPa),
- **Δ** : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante (kPa/°C),
- **γ** : Constante psychrométrique (kPa/°C),

Nous avons calculé l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>) à l'aide du logiciel CROPWAT 8.0 (FAO, 2008). Ce calcul repose sur l'intégration des données climatiques mensuelles suivantes :

- **Température** : minimales et maximales mensuelles,
- **Humidité relative** : exprimée en pourcentage (%),
- **Insolation journalière** : en heures par jour,
- **Vitesse du vent** : exprimée en m/s. [10]

Les résultats de l'ET<sub>0</sub> calculée pour la zone d'étude sont comme suit :

**Tableau III.1** : Le résultat de l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>) de la station Zeribet El Oeud à l'aide du logiciel CROPWAT

| Mois      | Temp Moy (°C) | Humidité (%) | Vent (m/s) | Insolation (heures) | Ray (MJ/m <sup>2</sup> /jour) | Eto (mm/mois) |
|-----------|---------------|--------------|------------|---------------------|-------------------------------|---------------|
| Janvier   | 12.6          | 54           | 3          | 7.4                 | 11.6                          | 75.05         |
| Février   | 13.5          | 46           | 3.2        | 8.6                 | 15.2                          | 90.95         |
| Mars      | 17.5          | 40           | 2.3        | 9.5                 | 19.5                          | 125.53        |
| Avril     | 22.4          | 41           | 2.5        | 10.8                | 24.1                          | 166.74        |
| Mai       | 26.9          | 45           | 2.9        | 11                  | 25.9                          | 210.88        |
| Juin      | 32.3          | 40           | 3.1        | 11.8                | 27.5                          | 253.96        |
| Juillet   | 35.6          | 39           | 3.2        | 11.3                | 26.5                          | 284.56        |
| Août      | 34.3          | 38           | 3          | 11                  | 24.8                          | 264.37        |
| Septembre | 29.4          | 40           | 3.5        | 10.4                | 21.5                          | 221.09        |
| Octobre   | 23            | 45           | 2.3        | 9.2                 | 16.7                          | 135.95        |
| Novembre  | 17.3          | 55           | 3.3        | 8                   | 12.6                          | 96.53         |
| Décembre  | 12.9          | 59           | 2.4        | 7.3                 | 10.7                          | 62.09         |
| Moyenne   | 23.1          | 45           | 2.9        | 9.7                 | 19.7                          | 1987.7        |

### III.3.1 Calcul de la pluie efficace

La pluie efficace représente la part des précipitations effectivement absorbée par le sol et utilisée par les cultures, après déduction des pertes par évaporation et ruissellement. Elle est influencée par plusieurs facteurs, notamment la région climatique, la nature des précipitations et le type de sol. Dans notre mémoire, et vu le caractère aride de la région d'étude, nous avons adopté la méthode du pourcentage fixe, dans ce cas :

$$\text{Pluies efficaces (mm/mois)} = A \times \text{Pluies totales (mm/mois)} \dots\dots\dots(\text{III.4})$$

Où A est un coefficient fixé à 0,6.

Les résultats obtenus à l'aide de cette méthode sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau III.2 : Précipitation efficace dans la zone d'étude**

| Mois                                    | Sep  | Oct  | Nov  | Dec | Jan  | Fev | Mars | Avr  | Mai  | Juin | Juil | Aout |
|-----------------------------------------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| <b>P<sub>moy80%</sub><br/>(mm/mois)</b> | 24.2 | 19.4 | 23.8 | 4.4 | 12.0 | 8.5 | 16.2 | 15.7 | 16.5 | 9.9  | 0.4  | 4.7  |
| <b>P<sub>eff</sub> (mm)</b>             | 14.5 | 11.6 | 14.3 | 0   | 7.2  | 5.1 | 9.7  | 9.4  | 9.9  | 5.9  | 0    | 0    |

Interprétations : pour les mois de Décembre, juillet et Aout, vu que la pluie efficace est inférieure à 5mm/j, elle est considérée comme nulle.

### III.3.2 Calcul de la réserve en eau du sol

Le calcul de la réserve en eau du sol permet d'évaluer la quantité d'eau disponible pour les plantes dans la zone explorée par les racines, comprise entre le point de ressuyage (capacité au champ) et le point de flétrissement. Toutefois, plus l'humidité du sol diminue et se rapproche du point de flétrissement, plus l'absorption de l'eau devient difficile pour les plantes.

Pour déterminer la part d'eau facilement accessible, on utilise la réserve facilement utilisable (RFU), définie par la formule :

$$\text{RFU} = (\text{hcc} - \text{hpf}) \times Y \times \text{Da} \times Z \dots\dots\dots(\text{III.5})$$

Où :

- **hcc** : humidité à la capacité au champ,
- **hpf** : humidité au point de flétrissement,
- **Z** : profondeur explorée par les racines,
- **Y** : coefficient dépendant du type de sol (**généralement 2/3**),
- **Da** : densité apparente du sol.

La réserve en eau du sol ( $R_s$ ) pour un mois  $i-1$  est obtenue par :

$$R_s = K \times RFU \dots \dots \dots (III.6)$$

Le coefficient  $K$  varie selon l'état hydrique du sol : 1 lorsque la réserve est pleine, 1/2 ou 1/3 selon l'épuisement progressif de l'eau, et 0 si la réserve est totalement vide.

Cependant, après observation des pluies efficaces par rapport à l'évapotranspiration qui reste supérieure quelque soit le mois, la réserve en eau du mois précédent est considérée comme nulle. [10]

### III.3.3 Occupation des sols

La production agricole dans les zones arides repose sur des choix stratégiques pour s'adapter aux contraintes climatiques et hydriques. Les cultures maraîchères et céréalières en irrigué occupent une place essentielle, car elles constituent un aliment de base et s'adaptent relativement bien aux conditions de stress hydrique.

Dans notre zone d'étude, les grandes cultures comme les céréales (blé et orge), l'arboriculture rustique (l'olivier) et les cultures maraîchères sont les plus adaptées aux conditions pédoclimatiques locales.

**Tableau III.3 : Scénario d'occupation du sol du périmètre**

| Culture     | Céréales (%) | Maraichage (%) | Arboriculture (%) | Fourragères (%) | Total (%) |
|-------------|--------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------|
| Pourcentage | 50           | 30             | 15                | 5               | 100       |

### III.4 Estimation des coefficients cultureux ( $K_c$ ) :

Le coefficient cultural ( $K_c$ ) est un paramètre utilisé pour estimer l'évapotranspiration réelle (ETM) d'une culture en fonction de l'évapotranspiration de référence (ETM). Il dépend du type de culture, de son stade de développement et des conditions climatiques.

Le coefficient cultural ( $K_c$ ) est utilisé pour calculer l'évapotranspiration réelle (ETM) d'une culture en multipliant l'évapotranspiration de référence (ET0) par  $K_c$  :

$$ETM = ET0 \times K_c \dots \dots \dots (III.7)$$

Cette estimation est fondamentale pour une gestion efficace de l'irrigation, en évitant à la fois le stress hydrique et le gaspillage d'eau. Le tableau ci-dessous présente les coefficients cultureux pour les cultures sélectionnées. [10]

Tableau III.4 : Coefficients culturaux (Kc) des cultures sélectionnées

| Culture             | Sep  | Oct  | Nov  | Dec  | Jan  | Fev  | Mars | Avr  | Mai  | Juin | Juil | Aout |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Blé                 | -    | 0.3  | 0.4  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 1    | 0.9  | 0.87 | 0.23 | -    | -    |
| Orge grain          | -    | -    | 0.3  | 0.4  | 0.7  | 0.85 | 0.95 | 0.75 | 0.55 | 0.4  | -    | -    |
| Pomme de terre (AS) | 0.5  | 0.7  | 0.95 | 0.75 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Oignon              | -    | 0.5  | 0.75 | 0.95 | 0.9  | 0.7  | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Ail                 | -    | 0.5  | 0.75 | 0.85 | 0.9  | 0.7  | 0.55 | -    | -    | -    | -    | -    |
| Tomate              | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0.5  | 0.85 | 1.15 | 0.85 | -    | -    |
| Olivier             | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.65 | 0.75 | 0.75 |
| Amandier            | 0.55 | 0.55 | 0.5  | 0.5  | 0.55 | 0.55 | 0.55 | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.7  |
| Sorgho              | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0.4  | 0.6  | 0.8  | 0,6  | -    | -    |
| Avoine              | -    | 0.3  | 0,40 | 0,70 | 0,85 | 0,95 | 1,05 | 1,00 | 0,80 | 0,25 | -    | -    |

(Source : FAO)

### III.5 Estimation des besoins en eau des cultures

Les besoins en eau de chaque culture sont déterminés en fonction de son stade de développement végétatif.

#### III.5.1 Les besoins de lessivage :

L'eau utilisée pour l'irrigation de notre périmètre est de classe C3S1, ce qui entraîne un risque de dépôt de sels de la part des racines des plantes. Par conséquent, il est nécessaire d'ajouter une quantité d'eau supplémentaire lors de l'irrigation pour évacuer l'excédent de sels, en les dirigeant vers les couches profondes du sol, hors de portée des racines des plantes. Le lessivage est ainsi effectué pour prévenir la salinisation primaire.

La fraction de lessivage est déterminée en fonction de la méthode de Rhoads :

$$LR = \frac{Ce_{iw}}{5C_{ees} - Ce_{iw}} \dots\dots\dots(III.8)$$

Avec :

- **LR** : fraction de lessivage,
- **Ce<sub>iw</sub>** : conductivité électrique d'eau d'irrigation, pour notre cas : 1.95 mmohms/cm,

- **Cees** : conductivité électrique du sol qui provoque une chute de rendement de 10%. [8]

(Nous avons utilisé les résultats du tableau de tolérance des cultures à la salinité fournie par la FAO).

Le volume de lessivage est calculé par la formule ci-dessous :

$$V_{less} = \frac{ETM \times LR}{1 - LR} \dots\dots\dots(III.9)$$

Le tableau ci-dessous présente les résultats du calcul du volume de lessivage nécessaire pour chaque culture :

**Tableau III.5** : Volumes de lessivage pour chaque culture

| Mois  | Blé   | Orge grain | Pomme de terre | Tomate | Ail   | Oignon | Sorgho | Avoine | Amandier |
|-------|-------|------------|----------------|--------|-------|--------|--------|--------|----------|
| Sep   |       |            | 25.07          |        |       |        |        |        | 38.87    |
| Oct   | 2.40  |            | 21.58          |        | 25.99 | 25.99  |        | 2.33   | 23.90    |
| Nov   | 2.27  | 1.22       | 20.79          |        | 27.68 | 27.68  |        | 2.21   | 15.43    |
| Dec   | 2.19  | 1.05       | 10.56          |        | 20.18 | 22.56  |        | 2.49   | 9.93     |
| Jan   | 2.65  | 2.22       |                |        | 25.83 | 25.83  |        | 3.65   | 13.20    |
| Fev   | 3.21  | 3.27       |                |        | 24.34 | 24.34  |        | 4.94   | 15.99    |
| Mars  | 7.40  | 5.04       |                | 9.00   | 26.40 |        | 2.96   | 7.54   | 22.07    |
| Avr   | 8.84  | 5.29       |                | 20.32  |       |        | 5.89   | 9.53   | 37.31    |
| Mai   | 10.81 | 4.91       |                | 34.77  |       |        | 9.94   | 9.65   | 47.19    |
| Juin  | 3.44  | 4.30       |                | 30.95  |       |        | 8.98   | 3.63   | 56.83    |
| Juill |       |            |                |        |       |        |        |        | 63.68    |
| Aout  |       |            |                |        |       |        |        |        | 59.16    |

## III.5.2 Estimation des besoins en eau des céréales :

Tableau III.6 : Calcul des besoins en eau pour le Blé

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | Kc   | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       |      |             |            |      |             |                                         |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       | 0.1  | 11.67       | 0.00       | 0.3  | 40.79       | 27.67                                   |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        | 0.3  | 35.00       | 0.00       | 0.4  | 38.61       | 21.84                                   |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        | 0.5  | 58.33       | 0.00       | 0.6  | 37.25       | 35.92                                   |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        | 0.6  | 70.00       | 0.00       | 0.6  | 45.03       | 38.08                                   |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        | 0.6  | 70.00       | 0.00       | 0.6  | 54.57       | 50.98                                   |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       | 0.6  | 70.00       | 0.00       | 1    | 125.53      | 119.97                                  |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       | 0.6  | 70.00       | 0.00       | 0.9  | 150.07      | 146.35                                  |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       | 0.6  | 70.00       | 0.00       | 0.87 | 183.47      | 181.08                                  |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       | 0.6  | 70.00       | 0.00       | 0.23 | 58.41       | 53.93                                   |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       |      |             |            |      |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       |      |             |            |      |             |                                         |

Tableau III.7 : Calcul des besoins en eau pour l'orge en grain

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | Kc   | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       |      |             |            |      |             |                                         |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       |      |             |            |      |             |                                         |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        | 0.3  | 35          | 0          | 0.3  | 28.96       | 11.14                                   |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        | 0.5  | 58.33       | 0          | 0.4  | 24.84       | 25.89                                   |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        | 0.6  | 70          | 0          | 0.7  | 52.54       | 45.16                                   |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        | 0.6  | 70          | 0          | 0.85 | 77.31       | 73.78                                   |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       | 0.6  | 70          | 0          | 0.95 | 119.25      | 111.33                                  |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       | 0.6  | 70          | 0          | 0.75 | 125.06      | 117.79                                  |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       | 0.6  | 70          | 0          | 0.55 | 115.98      | 107.69                                  |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       | 0.6  | 70          | 0          | 0.4  | 101.58      | 97.96                                   |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       |      |             |            |      |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       |      |             |            |      |             |                                         |

## III.5.3 Estimation des besoins en eau des maraîchages :

Tableau III.8 : Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre (AS)

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | K <sub>c</sub> | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       | 0.2  | 23.33       | 0          | 0.5            | 110.55      | 116.26                                  |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.7            | 95.17       | 101.23                                  |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        | 0.5  | 58.33       | 0          | 0.95           | 91.70       | 93.45                                   |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        | 0.5  | 58.33       | 0          | 0.75           | 46.57       | 57.13                                   |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       |      |             |            |                |             |                                         |

Tableau III.9 : Calcul des besoins en eau pour la tomate

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | K <sub>c</sub> | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       | 0.6  | 70          | 0          | 0.5            | 62.77       | 58.81                                   |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       | 0.9  | 105         | 0          | 0.85           | 141.73      | 149.49                                  |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       | 1.2  | 140         | 0          | 1.15           | 242.51      | 264.08                                  |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       | 1.2  | 140         | 0          | 0.85           | 215.87      | 238.9                                   |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       |      |             |            |                |             |                                         |

Tableau III.10 : Calcul des besoins en eau pour l'oignon

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | K <sub>c</sub> | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       | 0.2  | 23.33       | 0          | 0.5            | 67.98       | 78.45                                   |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.75           | 72.40       | 81.04                                   |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.95           | 58.99       | 81.55                                   |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.9            | 67.55       | 83.78                                   |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.7            | 63.67       | 81.21                                   |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       |      |             |            |                |             |                                         |

Tableau III.11 : Calcul des besoins en eau pour l'Ail

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | K <sub>c</sub> | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       | 0.2  | 23.33       | 0          | 0.5            | 67.98       | 78.45                                   |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        | 0.2  | 23.33       | 0          | 0.75           | 72.40       | 81.04                                   |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.85           | 52.78       | 72.96                                   |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.9            | 67.55       | 83.78                                   |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.7            | 63.67       | 81.21                                   |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.55           | 69.04       | 82.48                                   |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       |      |             |            |                |             |                                         |

## III.5.4 Estimation des besoins en eau des arboricultures :

Tableau III.12 : Calcul des besoins en eau pour l'Amandier

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | K <sub>c</sub> | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.55           | 121.60      | 141.11                                  |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.55           | 74.77       | 83.15                                   |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        | 1.5  | 175         | 0          | 0.5            | 48.27       | 44.66                                   |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        | 1.5  | 175         | 0          | 0.5            | 31.05       | 44.5                                    |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        | 1.5  | 175         | 0          | 0.55           | 41.28       | 44.88                                   |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        | 1.5  | 175         | 0          | 0.55           | 50.02       | 59.21                                   |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.55           | 69.04       | 78.15                                   |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.7            | 116.72      | 141.47                                  |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.7            | 147.62      | 181.61                                  |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.7            | 177.77      | 226.68                                  |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.7            | 199.19      | 262.87                                  |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       | 1.5  | 175         | 0          | 0.7            | 185.06      | 244.22                                  |

## III.5.5 Estimation des besoins en eau des Fourragères :

Tableau III.13 : Calcul des besoins en eau pour Le Sorgho

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Pe <sub>eff</sub><br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | K <sub>c</sub> | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|---------------------------|------------------------------|------|-------------|------------|----------------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36                     | 221.09                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Oct   | 19.4         | 15.52                     | 135.95                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Nov   | 23.8         | 19.04                     | 96.53                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Dec   | 4.4          | 0.00                      | 62.09                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Jan   | 12           | 9.60                      | 75.05                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Fev   | 8.5          | 6.80                      | 90.95                        |      |             |            |                |             |                                         |
| Mars  | 16.2         | 12.96                     | 125.53                       | 0.3  | 35          | 0          | 0.4            | 50.21       | 40.21                                   |
| Avr   | 15.7         | 12.56                     | 166.74                       | 0.8  | 93.3        | 0          | 0.6            | 100.04      | 93.37                                   |
| Mai   | 16.5         | 13.20                     | 210.88                       | 1.2  | 140         | 0          | 0.8            | 168.70      | 165.44                                  |
| Juin  | 9.9          | 7.92                      | 253.96                       | 1.2  | 140         | 0          | 0.6            | 152.38      | 153.44                                  |
| Juill | 0.4          | 0.00                      | 284.56                       |      |             |            |                |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00                      | 264.37                       |      |             |            |                |             |                                         |

Tableau III.14 : Calcul des besoins en eau pour l'Avoine

| Mois  | Pmoy<br>(mm) | Peff<br>(mm) | ET <sub>0</sub><br>(mm/mois) | Z(m) | RFU<br>(mm) | RS<br>(mm) | Kc   | ETM<br>(mm) | B <sub>net</sub><br>+ lessivage<br>(mm) |
|-------|--------------|--------------|------------------------------|------|-------------|------------|------|-------------|-----------------------------------------|
| Sep   | 24.2         | 19.36        | 221.09                       |      |             |            |      |             |                                         |
| Oct   | 19.4         | 15.52        | 135.95                       | 0.4  | 46.67       | 0          | 0.3  | 40.79       | 27.6                                    |
| Nov   | 23.8         | 19.04        | 96.53                        | 0.7  | 81.67       | 0          | 0.4  | 38.61       | 21.78                                   |
| Dec   | 4.4          | 0.00         | 62.09                        | 0.9  | 105         | 0          | 0.7  | 43.46       | 42.43                                   |
| Jan   | 12           | 9.60         | 75.05                        | 1    | 116.67      | 0          | 0.85 | 63.79       | 57.84                                   |
| Fev   | 8.5          | 6.80         | 90.95                        | 1.2  | 140         | 0          | 0.95 | 86.40       | 84.54                                   |
| Mars  | 16.2         | 12.96        | 125.53                       | 1.2  | 140         | 0          | 1.05 | 131.81      | 126.39                                  |
| Avr   | 15.7         | 12.56        | 166.74                       | 1.2  | 140         | 0          | 1    | 166.74      | 163.71                                  |
| Mai   | 16.5         | 13.20        | 210.88                       | 1.2  | 140         | 0          | 0.8  | 168.70      | 165.15                                  |
| Juin  | 9.9          | 7.92         | 253.96                       | 1.2  | 140         | 0          | 0.25 | 63.49       | 59.2                                    |
| Juill | 0.4          | 0.00         | 284.56                       |      |             |            |      |             |                                         |
| Aout  | 4.7          | 0.00         | 264.37                       |      |             |            |      |             |                                         |

## III.5.6 Calcul des besoins en eau pour les assolements 1 et 2 :

Tableau III.15 : Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 1

| Culture   | Blé    | Pomme de terre | Tomate | Amandier | Sorgho | Total  |
|-----------|--------|----------------|--------|----------|--------|--------|
| Septembre | 0      | 116.26         |        | 141.11   |        | 257.37 |
| Octobre   | 27.67  | 101.23         |        | 83.15    |        | 212.05 |
| Novembre  | 21.84  | 93.45          |        | 44.66    |        | 159.95 |
| Décembre  | 35.92  | 57.13          |        | 44.5     |        | 137.55 |
| Janvier   | 38.08  |                |        | 44.88    |        | 82.96  |
| Février   | 50.98  |                |        | 59.21    |        | 110.19 |
| Mars      | 119.97 |                | 58.81  | 78.15    | 40.21  | 297.14 |
| Avril     | 146.35 |                | 149.49 | 141.47   | 93.37  | 530.68 |
| Mai       | 181.08 |                | 264.08 | 181.61   | 165.44 | 792.21 |
| Juin      | 53.93  |                | 238.9  | 226.68   | 153.44 | 672.95 |
| Juillet   | 0      |                |        | 262.87   |        | 262.87 |
| Août      | 0      |                |        | 244.22   |        | 244.22 |

Tableau III.16 : Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 2

| Culture   | Orge grain | Ail   | Oignon | Amandier | Avoine | Total  |
|-----------|------------|-------|--------|----------|--------|--------|
| Septembre |            |       |        | 141.11   |        | 141.11 |
| Octobre   |            | 78.45 | 78.45  | 83.15    | 27.6   | 267.65 |
| Novembre  | 11.14      | 81.04 | 81.04  | 44.66    | 21.78  | 239.66 |
| Décembre  | 25.89      | 72.96 | 81.55  | 44.5     | 42.43  | 267.33 |
| Janvier   | 45.16      | 83.78 | 83.78  | 44.88    | 57.84  | 315.44 |
| Février   | 73.78      | 81.21 | 81.21  | 59.21    | 84.54  | 379.95 |
| Mars      | 111.33     | 82.48 |        | 78.15    | 126.39 | 398.35 |
| Avril     | 117.79     |       |        | 141.47   | 163.71 | 422.97 |
| Mai       | 107.69     |       |        | 181.61   | 165.15 | 454.45 |
| Juin      | 97.96      |       |        | 226.68   | 59.2   | 383.84 |
| Juillet   |            |       |        | 262.87   |        | 262.87 |
| Août      |            |       |        | 244.22   |        | 244.22 |

### III.5.7 Calcul du débit spécifique

Les débits spécifiques sont calculés en tenant compte des besoins hydriques de chaque culture, définis à partir de la répartition culturale. Pour répondre à la consommation de pointe, l'irrigation est assurée par un apport d'eau constant, disponible en continu sur 24 heures, garantissant ainsi la satisfaction des besoins mensuels.

Le débit spécifique se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$q_s = \frac{B_{net}}{N_j * N_i * 3600 * E_i} \dots\dots\dots(III.10)$$

Avec :

- **Bnet** : besoin net en eau du mois critique (mm/mois),
- **Nj** : nombre de jours du mois de pointe (31 jours),
- **Ni** : durée d'irrigation quotidienne (23 heures),
- **Ei** : efficience d'irrigation estimée à 75 % (0.75).

Les besoins en eau sont calculés pour l'assolement le plus exigeant (Assolement I). Pour le mois de mai, avec un besoin net de **792.21 mm/mois**.

En appliquant la formule, on obtient :

Donc:  $q_s = 3.4 \text{ l/s/ha} > 1.5 \text{ l/s/ha}$

Le débit spécifique obtenu dépassant 1.5, il existe un risque de surdimensionnement des conduites de refoulement ou gravitaires. Pour y remédier, trois méthodes d'estimation du débit spécifique sont possibles :

- Calculer la moyenne des débits spécifiques de toutes les cultures,
- Considérer uniquement la moyenne des cultures les plus exigeantes,
- Retenir le débit spécifique de la culture la plus exigeante pour le mois de pointe.

Dans notre cas, nous adoptons la dernière approche en prenant le débit spécifique des tomates pour le mois de Mai.

**Bnet = 264.08 mm, donc donc:  $q_s = 1.3 \text{ l/s/ha}$**

### III.5.8 Evaluation du débit caractéristique :

Le calcul du débit caractéristique permet de déterminer le débit maximal que le système d'irrigation doit assurer pour chaque parcelle. Il est obtenu en multipliant le débit de pointe par la surface agricole utile, selon la formule suivante :

$$Q_{\text{car}} = q_s \times S \dots \dots \dots (\text{III.11})$$

- $q_s$  : débit spécifique de mois de pointe en (l/s/ha),
- $S$  : la superficie nette à irriguer = 150 ha.

$$Q_{\text{car}} = 195 \text{ l/s} = 0.195 \text{ m}^3/\text{s}$$

### III.5.9 Estimation des volumes d'eau d'irrigation

Connaître les volumes d'irrigation est essentiel pour bien gérer l'eau, prévoir le stockage et organiser l'arrosage. Nous avons évalué les besoins en eau de l'assolement le plus exigeant.

**Tableau III.17** : Estimation des volumes d'eau d'irrigation (Assolement 1)

| Culture        | Surface (ha) | Besoins nets (m <sup>3</sup> /ha) | Efficiencie | Besoins brutes (m <sup>3</sup> /ha) | Besoins en eau (m <sup>3</sup> ) |
|----------------|--------------|-----------------------------------|-------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Blé            | 75           | 675.82                            | 0.75        | 9010.93                             | 675 820                          |
| Pomme de terre | 22.5         | 368.07                            | 0.75        | 4907.6                              | 110 421                          |
| Tomate         | 22.5         | 711.28                            | 0.75        | 9483.73                             | 213 384                          |
| Amandier       | 22.5         | 1552.51                           | 0.75        | 20700.1                             | 465 753                          |
| Sorgho         | 7.5          | 452.46                            | 0.75        | 6032.8                              | 45 246                           |
| <b>Total</b>   | 150          | 37601.4                           |             | 50135.2                             | 1 510 624                        |

D'après le tableau précédent, on voit que notre périmètre nécessite un volume d'irrigation total de 1 510 624 m<sup>3</sup> d'eau.

### III.6 Conclusion :

L'étude des besoins en eau de notre périmètre a permis de quantifier avec précision les volumes nécessaires pour une irrigation optimale. Grâce à l'évaluation des paramètres climatiques, des caractéristiques du sol et des exigences hydriques des cultures, nous avons pu estimer un besoin total d'environ 1 510 700 m<sup>3</sup> d'eau.

Une gestion efficace de ces ressources est essentielle pour assurer la durabilité des systèmes d'irrigation, optimiser le rendement agricole et prévenir les risques de gaspillage ou de surdimensionnement des infrastructures.

# **Chapitre IV**

## **Etude du système d'adduction- distribution**

## Chapitre IV : Etude du système d'adduction-distribution

### IV.1 Introduction :

Le système d'adduction dans le périmètre de Tarrouma permet le captage, le transport et la distribution de l'eau pour l'irrigation, il permet d'organiser les arrosages en période d'été et de soutenir l'activité agricole dans cette zone aux ressources en eau très limitées.

Ce chapitre présente les composantes du système d'adduction, son fonctionnement, ainsi que les étapes du dimensionnement hydraulique.

### IV.2 Ressources en eau du périmètre :

L'alimentation en eau du périmètre de Tarrouma repose principalement sur des forages profonds. L'eau extraite est d'abord stockée dans un bassin situé à l'entrée du périmètre, qui joue un rôle de régulation et de stockage temporaire. À partir de ce bassin, l'eau est acheminée vers les parcelles agricoles par un système de pompage. Le transport se fait à travers des conduites principales, qui alimentent un réseau de distribution ramifié. Ce réseau se prolonge jusqu'aux bornes d'arrosage, implantées directement sur les parcelles exploitées, assurant ainsi une distribution efficace de l'eau pour les besoins en irrigation. [2]

### IV.3 Organisation du périmètre

Le périmètre de Tarrouma couvre une superficie totale de 150 hectares, divisée en 22 îlots, la superficie varie entre 2,8 hectares et 10,7 hectares. Cette organisation en îlots permet une meilleure structuration du réseau d'adduction, facilitant ainsi la distribution de l'eau. [2]

### IV.4 Ilots et bornes d'irrigation

Un îlot d'irrigation est une unité agricole délimitée et irriguée par un système spécifique. L'organisation des bornes dans un périmètre agricole en îlots doit tenir compte de plusieurs facteurs, tels que la taille des exploitations, la topographie du terrain, les contraintes économiques. [11]

### IV.5 Rôle et fonction de la borne d'irrigation :

La borne d'irrigation joue un rôle central dans le réseau de distribution d'eau agricole : elle constitue l'interface entre le réseau principal d'irrigation et les exploitations agricoles, elle permet de gérer la quantité d'eau délivrée à chaque îlot en fonction de ses besoins. [11]

### IV.6 Calcul hydraulique des bornes :

Le débit des bornes est calculé en fonction de la superficie de l'îlot et du débit spécifique requis pour l'irrigation.

Le débit est calculé comme suit :

$$Q_b = q_s \times S \dots\dots\dots (III.1)$$

- $Q_b$  : Débit de la borne (l/s),
- $q_s$  : Débit spécifique (l/s/ha),
- $S$  : Superficie de l'îlot irrigué (ha). [11]

#### IV.6.1 Choix du diamètre de la borne

Le choix du diamètre d'une borne d'irrigation dépend directement du débit qu'elle doit fournir. Les valeurs recommandées sont présentées dans le tableau IV.1 :

**Tableau IV.1 : Type de bornes en fonction de Débit fourni**

| Type      | Débit fourni (Q)                     | Entrées                                     | Sortie               |
|-----------|--------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|
| <b>A2</b> | $Q < 11.11$ l/s                      | 1 entrée $\Phi$ 80, $\Phi$ 100              | 2 sorties $\Phi$ 65  |
| <b>A4</b> | $Q < 11.11$ l/s                      | 2 entrées $\Phi$ 80, $\Phi$ 100             | 4 sorties $\Phi$ 65  |
| <b>B</b>  | $11.11 < Q < 22.22$ l/s              | 2 entrées $\Phi$ 80, $\Phi$ 100, $\Phi$ 125 | 2 sorties $\Phi$ 100 |
| <b>C</b>  | $Q > 80$ m <sup>3</sup> /h 33.33 l/s | 2 entrées $\Phi$ 80, $\Phi$ 100, $\Phi$ 125 | 1 sorties $\Phi$ 150 |

**Tableau IV.2 : Calcul des débits des îlots et choix du type de borne**

| Îlot | Borne | Nombre de parcelles | Superficie îlot (ha) | Débit (l/s) | Matériel | Type de borne |
|------|-------|---------------------|----------------------|-------------|----------|---------------|
| I 1  | B1    | 2                   | 5.02                 | 6.58        | Fonte    | <b>A2</b>     |
| I 2  | B2    | 2                   | 9.48                 | 12.42       | Fonte    | <b>B</b>      |
| I 3  | B3    | 4                   | 11.67                | 15.29       | Fonte    | <b>B</b>      |
| I 4  | B4    | 2                   | 7.77                 | 10.18       | Fonte    | <b>A2</b>     |
| I 5  | B5    | 2                   | 9.21                 | 12.07       | Fonte    | <b>B</b>      |
| I 6  | B6    | 2                   | 5.14                 | 6.73        | Fonte    | <b>A2</b>     |
| I 7  | B7    | 2                   | 9.75                 | 12.77       | Fonte    | <b>B</b>      |
| I 8  | B8    | 2                   | 9.54                 | 12.50       | Fonte    | <b>B</b>      |
| I 9  | B9    | 2                   | 5.87                 | 7.69        | Fonte    | <b>A2</b>     |
| I 10 | B10   | 2                   | 7.80                 | 10.22       | Fonte    | <b>A2</b>     |
| I 11 | B11   | 2                   | 4.76                 | 6.24        | Fonte    | <b>A2</b>     |
| I 12 | B12   | 2                   | 3.70                 | 4.85        | Fonte    | <b>A2</b>     |
| I 13 | B13   | 2                   | 3.48                 | 4.56        | Fonte    | <b>A2</b>     |

|      |     |   |       |       |       |           |
|------|-----|---|-------|-------|-------|-----------|
| I 14 | B14 | 2 | 2.80  | 3.67  | Fonte | <b>A2</b> |
| I 15 | B15 | 4 | 10.17 | 13.32 | Fonte | <b>B</b>  |
| I 16 | B16 | 4 | 10.20 | 13.36 | Fonte | <b>B</b>  |
| I 17 | B17 | 2 | 5.64  | 7.39  | Fonte | <b>A2</b> |
| I 18 | B18 | 2 | 3.68  | 4.82  | Fonte | <b>A2</b> |
| I 19 | B19 | 2 | 4.07  | 5.33  | Fonte | <b>A2</b> |
| I 20 | B20 | 2 | 8.84  | 11.58 | Fonte | <b>B</b>  |
| I 21 | B21 | 2 | 5.72  | 7.49  | Fonte | <b>A2</b> |
| I 22 | B22 | 2 | 5.69  | 7.45  | Fonte | <b>A2</b> |

## IV.7 Etude du système de pompage

Un système de pompage doit être installé afin d'assurer la mise en charge du réseau à partir du bassin d'accumulation. Ce système doit permettre le transfert efficace de l'eau stockée vers les parcelles agricoles, en garantissant un débit et une pression adaptés aux besoins de l'exploitation.

### IV.7.1 Description des pompes

La pompe est un dispositif utilisé pour aspirer, déplacer des liquides. Il est important d'éviter la cavitation, qui peut réduire le débit et endommager la pompe.

Il existe deux types principaux de pompes :

- **Les pompes volumétriques**, adaptées aux liquides visqueux ou aux eaux usées,
- **Les turbopompes**, couramment utilisées en irrigation, qui assurent un débit continu grâce à un mouvement rotatif. [12]

#### IV.7.1.1 Les turbopompes

Les pompes se répartissent en trois grandes catégories, selon le type d'écoulement : radial, axial ou mixte. Chaque type est adapté à des conditions de fonctionnement spécifiques.

- **Les pompes à écoulement radial** : Ce sont des pompes centrifuges utilisées pour relever de faibles débits à de grandes hauteurs. Le fluide circule radialement, et la hauteur de refoulement augmente avec le diamètre de la roue.
- **Les pompes axiales** : Aussi appelées pompes hélices, elles déplacent le fluide le long de l'axe de rotation grâce à des pales courbes. Elles sont idéales pour des très forts débits avec une faible hauteur de refoulement, notamment dans le drainage ou la circulation d'eau.

- **Les pompes semi-axiales** : Appelées aussi pompes hélico-centrifuges, elles combinent un écoulement radial et axial. Elles sont conçues pour des forts débits avec des hauteurs moyennes à faibles, et offrent une bonne stabilité hydraulique. [12]

#### IV.7.2 Calcul de la hauteur manométrique totale d'élévation :

La hauteur manométrique totale représente l'énergie totale que la pompe doit fournir pour faire circuler l'eau entre le point d'aspiration et le point de refoulement.

Elle est donnée par la formule :

$$\text{HMT} = (\text{H}_a + \text{H}_{\text{ref}}) + \text{J} + \text{Pr} + \text{P}_{\text{NS}} \dots \dots \dots (\text{III.2})$$

Avec :

- **HMT** : Hauteur Manométrique Totale (en mètres),
- **H<sub>a</sub>** : Hauteur d'aspiration (en mètres),
- **H<sub>ref</sub>** : Hauteur de refoulement (m),
- **H<sub>g</sub>** : Hauteur géométrique (m),
- **J** : Pertes de charge (m),
- **P<sub>r</sub>** : Pression résiduelle (m) = 1m,
- **P<sub>NS</sub>** : Pression nominale de service (cas de l'asperseur) = 25 m. [13]

##### IV.7.2.1 Calcul de la hauteur géométrique H<sub>g</sub> :

La hauteur géométrique se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$H_g = H_b - H_r \dots \dots \dots (\text{III.3})$$

- **H<sub>b</sub>** : Altitude de la borne la plus éloignée = 25.86 m,
- **H<sub>r</sub>** : Altitude du réservoir = 25.09 m,
- **H<sub>g</sub> = 0.77 m**

##### IV.7.2.2 Calcul des pertes de charge totales

Les pertes de charge linéaires sont calculées par la formule de Hazen-Williams :

$$\Delta H_L = \text{J} = \left( \frac{3.592}{\text{CH}_w} \right)^{1.852} * \frac{\text{L}}{\text{D}^{4.87}} * \text{Q}^{1.852} \dots \dots \dots (\text{III.4})$$

Avec :

- **J** : Perte de charge en m,
- **CH<sub>w</sub>** : Coefficient de Hazen-Williams = 130,
- **L** : Longueur de la conduite, L = 2577 m,

- **D** : Diamètre de refoulement,
- **Q** : Le débit de refoulement m<sup>3</sup>/s. [13]

#### IV.7.2.3 Calcul des pertes de charge singulière

Les pertes de charge singulières sont estimées à partir des pertes linéaires selon la formule suivante :

$$\Delta H_s = 0.1 \times \Delta H_L \dots \dots \dots (III.5)$$

#### IV.7.3 Calcul du débit de refoulement

Le débit total à refouler est déterminé comme suit :

$$Q_{forcé} = 1,05 \times Q_c \dots \dots \dots (III.6)$$

$$Q_c = Q_s \times S_T = 1.3 \times 150 = 0.195 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Donc : } Q_{forcé} = 1,05 \times 0,195 = 0,205 \text{ m}^3/\text{s}.$$

#### IV.7.4 Calcul du diamètre approximatif

Le diamètre de la conduite de refoulement est estimé à l'aide de la loi de Bonin :

$$D = \sqrt{Q_{ref}} \dots \dots \dots (III.7)$$

$$D = \sqrt{0,205} = 0.453 = 453 \text{ mm}.$$

#### IV.7.5 Calcul du diamètre économique

L'alimentation du périmètre se fera par pompage de refoulement donc le diamètre de la conduite sera défini sur la base d'une étude techno-économique.

Les résultats du calcul des hauteurs manométriques pour différents diamètres sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.3** : Résultats du calcul de la HMT pour différents diamètres

| Diamètre (mm) | V (m/s) | Linéaire (m) | PDC lin | PDC sing | PDC tot | HMT (m) |
|---------------|---------|--------------|---------|----------|---------|---------|
| 300           | 2.90    | 2577         | 62.57   | 6.26     | 68.83   | 95.60   |
| 400           | 1.63    | 2577         | 15.41   | 1.54     | 16.96   | 43.73   |
| 500           | 1.04    | 2577         | 5.20    | 0.52     | 5.72    | 32.49   |
| 600           | 0.73    | 2577         | 2.14    | 0.21     | 2.35    | 29.12   |
| 700           | 0.53    | 2577         | 1.01    | 0.10     | 1.11    | 27.88   |

Le choix du diamètre de la conduite de refoulement repose sur une analyse technico-économique, basée sur la somme du coût d'investissement et du coût d'exploitation :

$$S = \text{coût d'investissement} + \text{coût d'exploitation}$$

#### IV.7.6 Calcul des frais d'investissement

La formule des frais d'investissement est la suivante :

$$F_{Am} = A \times Pr_t \dots \dots \dots (III.8)$$

Où :

$$A = \frac{i}{(i+1)^n - 1} + i \dots \dots \dots (III.9)$$

Avec :

- **A** : coefficient d'amortissement,
- **i** : Annuité (valeur arrêtée par les autorités concernées)  $i = 0.08$ ,
- **n** : Durée de projection du réseau d'adduction ; On prend :  $n = 30$  ans,
- **Pr<sub>t</sub>** : Prix de la conduite + prix de pose (DA),
- **L<sub>ref</sub>** : Longueur de la conduite de refoulement. [13]

Le tableau suivant résume les coûts d'investissement pour chaque diamètre de conduite :

**Tableau IV.4** : Estimation des frais d'investissement selon le diamètre de la conduite

| Diamètre (mm) | Prix de pose (DA) | Prix de MI (DA) | L (m) | Prix tot (DA) | A     | F inv(DA)    |
|---------------|-------------------|-----------------|-------|---------------|-------|--------------|
| 300           | 500               | 7500            | 2577  | 20 616 000    | 0.088 | 1 814 208    |
| 400           | 650               | 8490            | 2577  | 23 553 780    | 0.088 | 2 072 732.64 |
| 500           | 890               | 10800           | 2577  | 30 125 130    | 0.088 | 2 651 011.44 |
| 600           | 950               | 13000           | 2577  | 35 949 150    | 0.088 | 3 163 525.2  |
| 700           | 1100              | 15900           | 2577  | 43 809 000    | 0.088 | 3 855 192    |

#### IV.7.7 Calcul des frais d'exploitation

Pour calculer les frais d'exploitation nous avons la formule suivante :

$$F_{exp} = e \times E \dots \dots \dots (III.10)$$

Avec :

- **F<sub>exp</sub>** : Frais d'exploitation (en DA),
- **E** : Énergie totale consommée par la pompe (en kWh),
- **e** : Prix unitaire du kWh soit ( $e = 4,67$  DA/kWh).

### IV.7.8 Calcul de la puissance absorbée par la pompe

La puissance absorbée est déterminée selon la formule :

$$P_u = \frac{\rho \times g \times Q \times HMT}{\eta} \dots\dots\dots(III.11)$$

Avec :

- **P<sub>u</sub>** : Puissance absorbée par la pompe (KwH),
- **g** : Accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>),
- **Q<sub>forcé</sub>** : Débit à refoulé (m<sup>3</sup>/s),
- **HMT** : Hauteur manométrique totale (m),
- **η** : Rendement du pompage (75 %). [13]

### IV.7.9 Calcul de l'énergie consommée

L'énergie annuelle consommée par la station est :

$$E = P \times t \times 365 \dots\dots\dots(III.12)$$

Avec :

- **E** : Énergie totale consommée par la pompe pendant une année (kWh),
- **P** : Puissance absorbée (KwH),
- **t** : Temps de pompage (heure) on prend t = 23h.

Le Tableau IV.5 présente les frais d'exploitation annuels en fonction des différents diamètres de conduite :

**Tableau IV.5** : Estimation des frais d'exploitation selon le diamètre de la conduite

| Diamètre (mm) | HMT   | P (Kwh) | P (Kwh/an) | Fexp (DA)     |
|---------------|-------|---------|------------|---------------|
| <b>300</b>    | 95.60 | 256.33  | 2142902.72 | 10 007 355.68 |
| <b>400</b>    | 43.73 | 117.24  | 975265.52  | 4 554 489.98  |
| <b>500</b>    | 32.49 | 87.12   | 722343.92  | 3 373 346.08  |
| <b>600</b>    | 29.12 | 78.09   | 646579.08  | 3 019 524.32  |
| <b>700</b>    | 27.88 | 74.76   | 618606.64  | 2 888 893.00  |

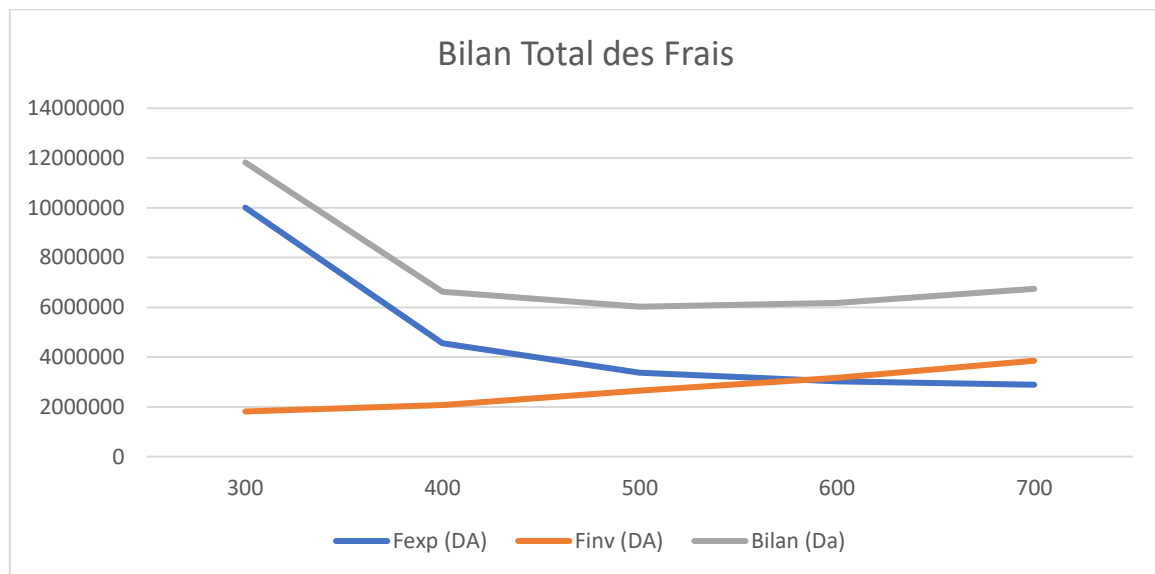
### IV.7.10 Calcul du bilan Bilan total des frais

Le bilan des frais d'exploitation et d'amortissement permet d'identifier le diamètre économique de la conduite de refoulement.

Le Tableau IV.6 présente le calcul détaillé du bilan total des frais pour chaque diamètre considéré.

**Tableau IV.6 : Bilan total des frais**

| Diamètre (mm) | F <sub>exp</sub> (DA) | F <sub>inv</sub> (DA) | Bilan (Da)    |
|---------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 300           | 10 007 355.68         | 1 814 208.00          | 11 821 563.68 |
| 400           | 4 554 489.98          | 2 072 732.64          | 6 627 222.62  |
| 500           | 3 373 346.08          | 2 651 011.44          | 6 024 357.52  |
| 600           | 3 019 524.32          | 3 163 525.20          | 6 183 049.52  |
| 700           | 2 888 893.00          | 3 855 192.00          | 6 744 085.00  |

**Figure IV.1.** Bilan économique total en fonction des diamètres étudiés

D'après l'étude technico-économique, le diamètre de la conduite de refoulement est de 500 mm, correspondant à un débit de 0,205 m<sup>3</sup>/s et une hauteur manométrique totale (HMT) de 32.5.

#### IV.7.11 Choix de nombre et de type de pompe

Le choix du nombre de pompe se base sur plusieurs critères à savoir :

- Assurer le débit et la hauteur HMT demandés,
- Meilleur rendement,
- Vérifier la condition de non cavitation et (NPSH)<sub>r</sub> minimal,
- Puissance absorbée minimale. [13]

Afin de déterminer le type et le nombre de pompes adaptés aux exigences du projet, une modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel Caprari. Les résultats sont synthétisés dans le tableau IV.8 :

Tableau IV.7 : Résultats de Sélection nombre de Pompes – Logiciel Caprari

| Nombre de pompe | Q (l/s) | HMT (m) | Q <sub>p</sub> (l/s) | η (%) | N (tr/mn) | P <sub>ab</sub> (kw) | NPSH <sub>r</sub> (m) | Ø mm |
|-----------------|---------|---------|----------------------|-------|-----------|----------------------|-----------------------|------|
| 1               | 205     | 32.5    | -                    | -     | -         | -                    | -                     | -    |
| 2               | 102.5   | 32.5    | 104                  | 69.1  | 2920      | 50.8                 | 5.24                  | 125  |
| 3               | 68.3    | 32.5    | 69.5                 | 80.6  | 1460      | 28.6                 | 3.45                  | 125  |
| 4               | 51.3    | 32.5    | 52.5                 | 78.4  | 1460      | 22.8                 | 2.67                  | 125  |

L'analyse réalisée avec le logiciel Caprari a permis de prendre :

- 3 pompes principales identiques de type MEC-AZ 3/125A
- 1 pompe de secours de même modèle

La courbe caractéristique de notre pompe est montrée dans la figure

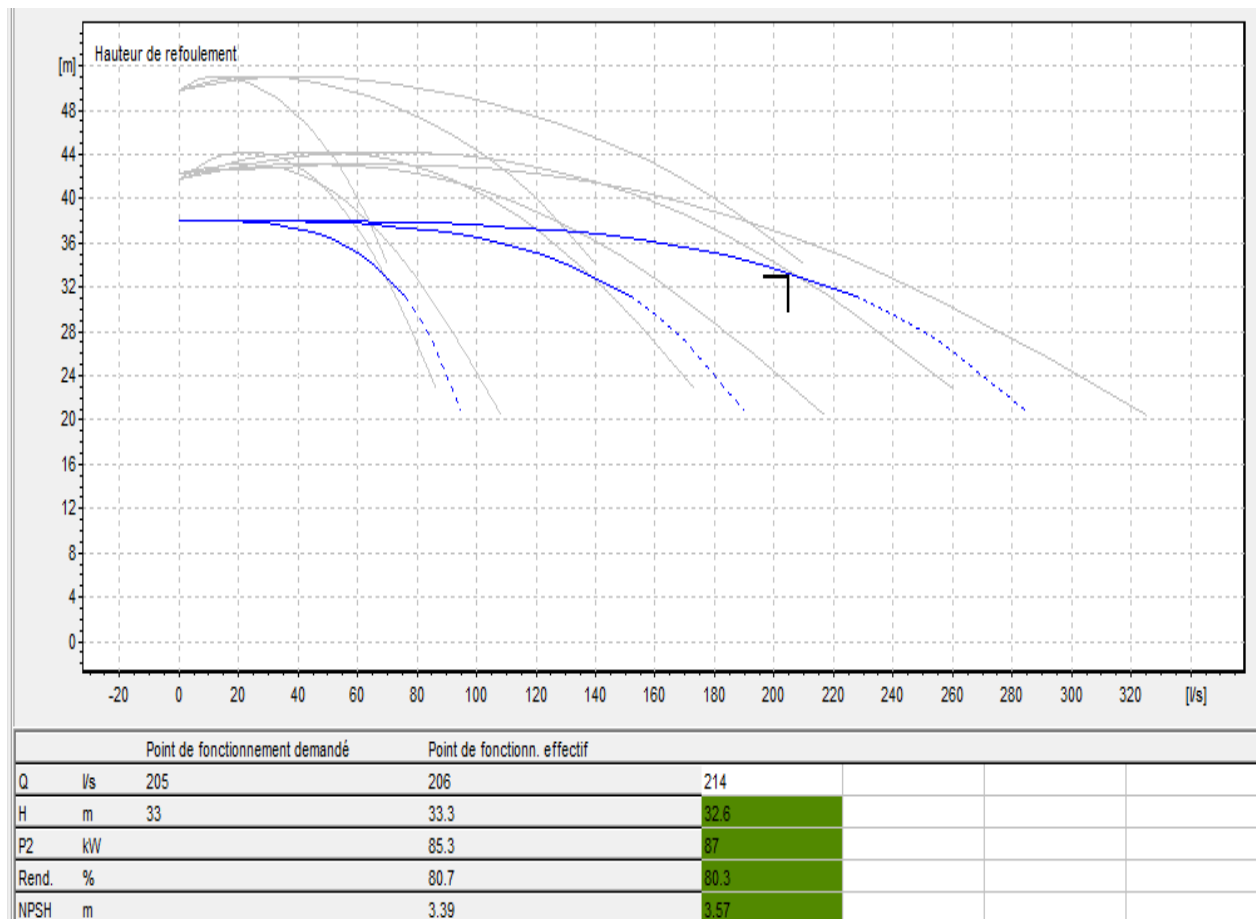


Figure IV.2 : Courbe caractéristique de la pompe

## IV.7.11.1 Protection contre de la cavitation :

La cavitation est la formation de bulles de vapeur dans une pompe lorsque la pression devient trop basse. Ces bulles éclatent en zones de haute pression, provoquant des dommages, du bruit et une perte de performance. Pour protéger la pompe contre ce phénomène, il est indispensable de vérifier la condition suivante:

$$(NPSH)_d > (NPSH)_r \dots\dots\dots(III.13)$$

Avec :

- $(NPSH)_r$  : la charge nette d'aspiration requise, fournie par le constructeur de la pompe
- $(NPSH)_d$  : la charge nette d'aspiration disponible, calculée par l'installateur ou le concepteur du réseau.

$$(NPSH)_d = \frac{P_{at}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - \left( h_a + \frac{V_{asp}^2}{2g} + \Delta H_{asp} \right) \dots\dots\dots(III.14)$$

Avec :

- $\frac{P_{at}}{\rho g}$  : Pression atmosphérique locale. Pour notre cas on prend  $\frac{P_{at}}{\rho g} = 10.33 \text{ m}$ ,
- $\frac{P_v}{\rho g}$  : Pression de vapeur du liquide. Pour une température d'eau égale à 20°C,  $\frac{P_v}{\rho g} = 0.24 \text{ m}$ ,
- $\Delta H_{asp}$  : Perte de charge à l'aspiration,
- $h_a$  : Différence de niveau entre la source et la pompe .on prend  $h_a = 2.0 \text{ m}$ ,
- $V_{asp}$  : Vitesse d'écoulement dans la conduite d'aspiration. [13]

**Tableau IV.8 :** Variation de la pression de vapeur en fonction de la température de l'eau

| T (°C)               | 5    | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 80   |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{P_v}{\rho g}$ | 0.09 | 0.12 | 0.24 | 0.43 | 0.75 | 1.25 | 4.82 |

❖ Calcul de  $V_{asp}$  :

$$Q = \frac{Q_r}{3} = 68.3 \text{ l/s} \dots\dots\dots(III.15)$$

Avec :  $D = 250 \text{ mm}$

$$V_{asp} = \frac{Q}{S} = \frac{0.0683}{0.049} = 1.39 \text{ m/s} \dots\dots\dots(III.16)$$

Donc :

$$\frac{V^2}{2g} = 0.1 \text{ m} \dots\dots\dots(III.17)$$

❖ Calcul de  $\Delta H_{asp}$  :

On prend 4m/1000m de linéaire, donc :

$$\Delta H_{asp} = \frac{4 \times 4}{1000} = 0,016 \text{ m} \dots \dots \dots \text{(III.18)}$$

Donc :  $NPSH_d = 10.33 - 0.24 - 2 - 0.016 - 0.1 = 8.17\text{m}$

$(NPSH)_r = 3.45 + r = 3.45 + 0.5 = 3.95$ , ( $r$  : marge de sécurité varie entre 0.3-0.5)

Puisque  $NPSH_d > NPSH_r$  Donc la pompe est bien protégée contre le risque de cavitation.

**IV.8 Dimensionnement du bassin de stockage**

Compte tenu de la grande superficie à irriguer, il a été décidé d'adopter un bassin de forme rectangulaire, le volume du réservoir est estimé selon la formule suivante :

$$V = Q_c \times T_{nf} \dots \dots \dots \text{(III.19)}$$

Avec :

- $V$  : volume d'eau d'irrigation ( $\text{m}^3$ ),
- $Q_c$  : débit caractéristique ( $\text{m}^3$ ),  $Q_c = 738 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- $T_{nf}$  : temps de non-fonctionnement, pris égal à 1 heure.

$$V = 738 \times 1 = 738 \text{ m}^3$$

On prend  $V = 750 \text{ m}^3$ .

## ❖ Les dimensions du bassin :

$H = 2\text{m} \times L = 25\text{m} \times l = 15\text{m} = 750\text{m}^3$ .

**IV.9 Etude du système de distribution**

Pour la desserte gravitaire, il est impératif de bien dimensionner les conduites principales et secondaires, et de choisir le matériau adéquat.

**IV.9.1 Choix du matériau des conduites :**

Le choix du matériau dépend de plusieurs critères :

- Pression d'exploitation,
- Nature du terrain,
- Coût économique,
- Facilité de pose et de maintenance. [13]

**IV.9.1.1 Conduites en fonte :****❖ Avantages :**

- Très bonne résistance aux fortes pressions,
- Résistance élevée à la corrosion,
- Matériau robuste et durable.

**❖ Inconvénients :**

- Matériau lourd,
- Coût relativement élevé,
- Faible élasticité. [13]

**IV.9.1.2 Conduites en PEHD :****❖ Avantages :**

- Excellente résistance chimique (corrosion, agressions chimiques),
- Grande souplesse et légèreté,
- Coût raisonnable pour les petits et moyens diamètres.

**❖ Inconvénients :**

- Très coûteux pour les diamètres supérieurs à 800 mm,
- Soudure délicate : risque de rupture si mal exécutée. [13]

Dans notre cas, les conduites seront d'en PEHD si  $D \leq 315$  mm et en fonte diamètre si le diamètre est supérieur à 315 mm.

**IV.9.2 Calcul des diamètres :**

Pour estimer le diamètre économique des conduites, on utilise la formule type Chezy, ce qui permet de calculer un premier diamètre théorique, qui sera ensuite normalisé selon les diamètres disponibles sur le marché.

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V_{adm}}} \dots\dots\dots (III.20)$$

Avec

- **D** : Diamètre intérieur de la conduite (en mm),
- **Q** : Débit d'eau circulant (en m<sup>3</sup>/s),
- **V<sub>adm</sub>** : Vitesse admissible dans la conduite (en m/s).

### IV.9.3 Calcul des pressions des nœuds et des bornes :

Le calcul des vitesses et des pressions a été effectué en se basant sur le théorème de Bernoulli.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \dots\dots\dots(\text{III.21})$$

- $Z_1$  et  $Z_2$  : Côte terrain naturel (m) aux points 1 et 2 (en m),
- $\frac{P_1}{\rho g}$  et  $\frac{P_2}{\rho g}$  : La hauteur de la pression (m) aux points 1 et 2,
- $\frac{v_1^2}{2g}$  et  $\frac{v_2^2}{2g}$  : La hauteur représentative de la vitesse d'écoulement (m) aux points 1 et 2,
- $\Delta H$  : Les pertes de charges totales (m) entre les 2 point 1 et 2.

Les pertes de charge linéaires dans la conduite sont évaluées en appliquant la formule de Hazen-Williams :

$$\Delta H_L = \left(\frac{3.592}{CH_w}\right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}} * Q^{1.852} \dots\dots\dots(\text{III.22})$$

- $\Delta H_L$  : Perte de charge en m,
- $CH_w$  : Coefficient de Hazan-Williams = 130,
- $L$  : Longueur de la conduite,
- $D$  : Diamètre de refoulement,
- $Q$  : Le débit de refoulement m<sup>3</sup>/s. [13]

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau IV.10

Tableau IV.9 : Les calculs hydrauliques du réseau de distribution

| N° du tronçon | Longueur tronçon (m) | Débit (l/s) | D calculé (mm) | Diamètre Nominal (mm) | Matériaux | V (m/s) | Pcharge Lin (m) | Pcharge total(m) | C terrain aval Z (m) | Cote Piezo (m) | Pression (m) | Pression (bars) |
|---------------|----------------------|-------------|----------------|-----------------------|-----------|---------|-----------------|------------------|----------------------|----------------|--------------|-----------------|
| R-ST          | 835.7                | 205         | 466.5          | 500                   | Fonte     | 1.04    | 1.69            | 1.85             | 26.4                 | 60.29          | 33.89        | 3.39            |
| ST-N1         | 125                  | 205         | 466.5          | 500                   | Fonte     | 1.04    | 0.25            | 0.28             | 26.2                 | 60.06          | 33.86        | 3.39            |
| N1-N2         | 156.6                | 19          | 142.0          | 160                   | PEHD      | 0.95    | 0.99            | 1.09             | 26.04                | 59.07          | 33.03        | 3.30            |
| N2-B1         | 40.7                 | 6.58        | 83.6           | 90                    | PEHD      | 1.03    | 0.60            | 0.66             | 26.09                | 59.04          | 32.95        | 3.30            |
| N2-N3         | 359.6                | 12.42       | 114.8          | 125                   | PEHD      | 1.01    | 3.45            | 3.79             | 25.67                | 55.62          | 29.95        | 3.00            |
| N3-B2         | 44.9                 | 12.45       | 115.0          | 125                   | PEHD      | 1.02    | 0.43            | 0.48             | 25.83                | 55.19          | 29.36        | 2.94            |
| N1-N4         | 256.55               | 186         | 444.4          | 500                   | Fonte     | 0.95    | 0.43            | 0.48             | 25.51                | 59.3           | 33.79        | 3.38            |
| N4-N5         | 55                   | 25.47       | 164.4          | 200                   | PEHD      | 0.81    | 0.20            | 0.22             | 25.48                | 59.04          | 33.56        | 3.36            |
| N5-B3         | 238                  | 15.29       | 127.4          | 160                   | PEHD      | 0.76    | 1.01            | 1.11             | 25.83                | 59             | 33.17        | 3.32            |
| N5-N6         | 328                  | 10.18       | 104.0          | 110                   | PEHD      | 1.07    | 4.06            | 4.46             | 25.24                | 55.05          | 29.81        | 2.98            |
| N6-B4         | 76.83                | 10.18       | 104.0          | 110                   | PEHD      | 1.07    | 0.95            | 1.05             | 25.51                | 54.28          | 28.77        | 2.88            |
| N4-N7         | 238.7                | 18.8        | 141.3          | 160                   | PEHD      | 0.94    | 1.48            | 1.63             | 26.2                 | 58.18          | 31.98        | 3.20            |
| N7-B5         | 45.54                | 12.07       | 113.2          | 125                   | PEHD      | 0.98    | 0.41            | 0.46             | 26.23                | 57.76          | 31.53        | 3.15            |
| N7-N8         | 399.2                | 6.73        | 84.5           | 90                    | PEHD      | 1.06    | 6.09            | 6.70             | 26.74                | 52.07          | 25.33        | 2.53            |
| N8-B6         | 53.03                | 6.73        | 84.5           | 90                    | PEHD      | 1.06    | 0.81            | 0.89             | 25.42                | 49.86          | 24.44        | 2.44            |
| N4-N9         | 175.17               | 141.73      | 387.9          | 400                   | Fonte     | 1.13    | 0.53            | 0.58             | 25.63                | 59.19          | 33.56        | 3.36            |
| N9-N10        | 209.5                | 17.91       | 137.9          | 160                   | PEHD      | 0.89    | 1.19            | 1.31             | 25.44                | 58.1           | 32.66        | 3.27            |
| N10-B9        | 61.87                | 7.69        | 90.4           | 110                   | PEHD      | 0.81    | 0.46            | 0.50             | 25.63                | 56.97          | 31.34        | 3.13            |
| N10-N11       | 190.3                | 10.22       | 104.2          | 110                   | PEHD      | 1.08    | 2.37            | 2.61             | 25.2                 | 57.86          | 32.66        | 3.27            |
| N11-B10       | 61.8                 | 10.22       | 104.2          | 110                   | PEHD      | 1.08    | 0.77            | 0.85             | 25.44                | 54.86          | 29.42        | 2.94            |
| N9-N12        | 74.04                | 123.82      | 362.6          | 350                   | Fonte     | 1.29    | 0.33            | 0.37             | 25.59                | 59.04          | 33.45        | 3.35            |
| N12-N13       | 237.7                | 25.27       | 163.8          | 200                   | PEHD      | 0.80    | 0.86            | 0.95             | 25.14                | 56.9           | 31.76        | 3.18            |

|         |        |       |       |     |       |      |      |      |       |       |       |      |
|---------|--------|-------|-------|-----|-------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| N13-B8  | 46.01  | 12.5  | 115.2 | 125 | PEHD  | 1.02 | 0.45 | 0.49 | 25.97 | 57.73 | 31.76 | 3.18 |
| N13-N14 | 236    | 12.77 | 116.4 | 125 | PEHD  | 1.04 | 2.38 | 2.62 | 25.44 | 55.01 | 29.57 | 2.96 |
| N14-B7  | 42.3   | 12.77 | 116.4 | 125 | PEHD  | 1.04 | 0.43 | 0.47 | 24.91 | 53.99 | 29.08 | 2.91 |
| N12-N15 | 18.55  | 98.55 | 323.4 | 350 | Fonte | 1.02 | 0.05 | 0.06 | 25.6  | 59.04 | 33.44 | 3.34 |
| N15-B14 | 70.87  | 3.67  | 62.4  | 75  | PEHD  | 0.83 | 0.86 | 0.94 | 25.44 | 58.13 | 32.69 | 3.27 |
| N15-N16 | 113.73 | 94.88 | 317.4 | 350 | Fonte | 0.99 | 0.31 | 0.34 | 26.04 | 59.35 | 33.31 | 3.33 |
| N16-N17 | 239.1  | 15.65 | 128.9 | 160 | PEHD  | 0.78 | 1.06 | 1.16 | 25.12 | 56.77 | 31.65 | 3.17 |
| N17-B13 | 42.64  | 4.56  | 69.6  | 75  | PEHD  | 1.03 | 0.77 | 0.85 | 25.14 | 56.9  | 31.76 | 3.18 |
| N17-N18 | 261.1  | 11.09 | 108.5 | 110 | PEHD  | 1.17 | 3.78 | 4.16 | 24.78 | 53.88 | 29.1  | 2.91 |
| N18-B12 | 39.74  | 4.85  | 71.8  | 75  | PEHD  | 1.10 | 0.80 | 0.88 | 25.59 | 53.83 | 28.24 | 2.82 |
| N18-N19 | 177.7  | 6.24  | 81.4  | 90  | PEHD  | 0.98 | 2.36 | 2.59 | 24.61 | 51.52 | 26.91 | 2.69 |
| N19-B11 | 41.52  | 6.24  | 81.4  | 90  | PEHD  | 0.98 | 0.55 | 0.61 | 24.96 | 50.97 | 26.01 | 2.60 |
| N16-N20 | 124.93 | 79.23 | 290.0 | 315 | PEHD  | 1.02 | 0.41 | 0.45 | 25.22 | 58.39 | 33.17 | 3.32 |
| N20-N21 | 222.9  | 26.68 | 168.3 | 200 | PEHD  | 0.85 | 0.89 | 0.98 | 25.48 | 57.5  | 32.02 | 3.20 |
| N21-B15 | 73.59  | 13.32 | 118.9 | 125 | PEHD  | 1.09 | 0.80 | 0.88 | 25.6  | 56.7  | 31.1  | 3.11 |
| N21-N22 | 307.5  | 13.36 | 119.1 | 125 | PEHD  | 1.09 | 3.38 | 3.71 | 25.97 | 54.12 | 28.15 | 2.82 |
| N22-B16 | 68.38  | 13.36 | 119.1 | 125 | PEHD  | 1.09 | 0.75 | 0.83 | 26.04 | 53.37 | 27.33 | 2.73 |
| N20-N23 | 59.17  | 52.55 | 236.2 | 250 | PEHD  | 1.07 | 0.28 | 0.31 | 25.13 | 53    | 27.87 | 2.79 |
| N23-N24 | 211    | 17.54 | 136.5 | 160 | PEHD  | 0.87 | 1.15 | 1.27 | 24.93 | 51.84 | 26.91 | 2.69 |
| N24-B17 | 29.28  | 7.39  | 88.6  | 90  | PEHD  | 1.16 | 0.53 | 0.58 | 24.96 | 51.31 | 26.35 | 2.64 |
| N24-N25 | 226.3  | 10.15 | 103.8 | 110 | PEHD  | 1.07 | 2.78 | 3.06 | 24.82 | 49.06 | 24.24 | 2.42 |
| N25-B18 | 31.64  | 4.82  | 71.5  | 75  | PEHD  | 1.09 | 0.63 | 0.70 | 24.7  | 48.42 | 23.72 | 2.37 |
| N25-N26 | 193.8  | 5.33  | 75.2  | 90  | PEHD  | 0.84 | 1.92 | 2.11 | 24.47 | 47.13 | 22.66 | 2.27 |
| N26-B19 | 31.79  | 5.33  | 75.2  | 90  | PEHD  | 0.84 | 0.32 | 0.35 | 24.5  | 46.82 | 22.32 | 2.23 |
| N23-N27 | 211.03 | 35.01 | 192.8 | 200 | PEHD  | 1.11 | 1.40 | 1.54 | 24.72 | 52.16 | 27.44 | 2.74 |

|         |       |       |       |     |      |      |      |      |       |       |       |      |
|---------|-------|-------|-------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| N27-N28 | 203.9 | 26.52 | 167.8 | 200 | PEHD | 0.84 | 0.81 | 0.89 | 24.8  | 51.35 | 26.55 | 2.66 |
| N28-B22 | 47.69 | 7.45  | 88.9  | 90  | PEHD | 1.17 | 0.88 | 0.97 | 24.9  | 50.47 | 25.57 | 2.56 |
| N28-N29 | 100   | 19.07 | 142.3 | 160 | PEHD | 0.95 | 0.64 | 0.70 | 24.78 | 50.71 | 25.93 | 2.59 |
| N29-B21 | 36.77 | 7.49  | 89.2  | 90  | PEHD | 1.18 | 0.68 | 0.75 | 25.03 | 50.03 | 25    | 2.50 |
| N29-N30 | 100   | 11.58 | 110.9 | 110 | PEHD | 1.22 | 1.57 | 1.73 | 25.42 | 49.14 | 23.72 | 2.37 |
| N30-B20 | 37.02 | 11.58 | 110.9 | 110 | PEHD | 1.22 | 0.58 | 0.64 | 25.86 | 48.56 | 22.7  | 2.27 |

D'après le tableau IV.10, les pressions mesurées varient entre 2,23 et 3,39 bars et au niveau des bornes vont de 2,23 à 3,3 bars. Ces valeurs sont globalement bonnes et suffisantes pour garantir une irrigation correcte.

#### **VI.6. Conclusion**

La conception du réseau d'adduction et de distribution est une étape importante dans un aménagement hydro-agricole, cela permet une organisation efficace du périmètre.

Pour le système de refoulement projeté, nous avons calculé le diamètre optimal de la conduite principale (500 mm) en s'appuyant sur une analyse technico-économique rigoureuse, équilibrant les coûts d'investissement et d'exploitation.

L'ensemble du système, du bassin de stockage jusqu'aux bornes d'irrigation, a été conçu pour garantir une gestion rationnelle et durable de la ressource en eau, élément clé pour le développement agricole de la région.

Pour le système de distribution, les résultats obtenus montrent que les pressions au niveau des bornes varient entre 2.23 et 3.3 bars ce qui respecte les normes nécessaires pour assurer une irrigation efficace et uniforme.

# **Chapitre V**

## **Choix de la technique d'irrigation**

## Chapitre V : Choix de la technique d'irrigation

### V.1 Introduction

L'irrigation est une pratique essentielle permettant d'assurer un apport en eau adéquat aux cultures, en particulier dans les régions où les précipitations sont insuffisantes ou irrégulières. Différentes techniques d'irrigation ont été développées afin de s'adapter aux conditions spécifiques du sol, du climat et des besoins des cultures.

Ce chapitre examine les principales méthodes d'irrigation en mettant en avant leurs avantages et contraintes. L'objectif est de déterminer la technique la plus adaptée aux caractéristiques du périmètre étudié, afin d'optimiser l'utilisation des ressources en eau tout en garantissant une production agricole durable et efficiente.

### V.2 Choix des techniques d'irrigation :

Le choix de la technique d'irrigation repose sur une combinaison de facteurs techniques et socio-économiques, influençant son efficacité et sa viabilité :

- Le type de culture,
- Le type de sol et la topographie,
- Les coûts d'investissement,
- Les disponibilités en main d'œuvre.

### V.3 Classification des techniques d'irrigation

Les principales techniques d'irrigation existant sont,

- Irrigation de surface ou gravitaire,
- Irrigation localisée (goutte à goutte),
- Irrigation par aspersion. [14]

#### V.3.1 Irrigation gravitaire :

L'irrigation gravitaire est une méthode ancestrale, très répandue se base sur l'écoulement naturel de l'eau par gravité, elle est privilégiée dans les zones où l'eau est abondante et la topographie favorable.

On distingue trois principales techniques d'irrigation de surface.

### V.3.1.1 Irrigation par ruissèlement :

Cette technique consiste à faire écouler l'eau à la surface du champ à partir de canaux ou de fossés. Elle ne fait généralement appel à aucun système de contrôle précis, comme des digues ou des vannes, ce qui la rend simple à mettre en œuvre, mais peu efficace en termes de gestion de l'eau. [14]

### V.3.1.2 Irrigation à la raie :

Cette méthode consiste à faire écouler l'eau dans des sillons étroits creusés entre les rangées de culture, espacés de 0,75 m à 1 m. L'eau s'infiltre principalement par les côtés des sillons, ce qui permet un apport localisé aux plantes et réduit les pertes par évaporation. C'est une technique intermédiaire entre les méthodes traditionnelles et les systèmes modernes d'irrigation. [14]



**Figure V.1:** Irrigation à la raie

### V.3.1.3 Irrigation par submersion :

Consiste à submerger une surface du sol aménagée en bassin et à y laisser la totalité de l'eau « s'infiltrer tout en stagnant ». Les bassins sont délimités par de petites digues arasées à l'horizontale où à laisser cette eau s'infiltrer dans le sol. Les cultures qui s'adaptent sont : le riz et certaines plantes aquatiques. [14]



**Figure V.2 : Irrigation par submersion**

#### **V.3.1.4 Avantages et inconvénients de l'irrigation par gravitaire :**

##### **❖ Avantages :**

- Technique simple ne nécessitant pas d'apport énergétique extérieur,
- Faible coût d'investissement,
- Possibilité de réalimentation des nappes,
- Irrigation de larges surfaces.

##### **❖ Inconvénients :**

- Aménagement préalable du terrain nécessaire,
- Importantes pertes d'eau et faible efficacité,
- Terrassements et nivellements nécessaires,
- Durée d'arrosage trop longue,
- Nécessite une main-d'œuvre considérable. [14]

#### **V.3.2 Irrigation localisée (goutte à goutte) :**

L'irrigation au goutte à goutte consiste à amener l'eau sous pression dans un système de canalisations, généralement en PEHD ; cette eau est ensuite distribuée en gouttes au champ par un nombre de goutteurs répartis tout le long des rangées des plantations. La zone humidifiée du sol est celle située au voisinage immédiat des racines des plantes. [14]



**Figure V.3 : Irrigation localisée**

#### **V.3.2.1 Avantages et inconvénients de l'irrigation localisée :**

##### **❖ Avantages**

- Utilisation efficace de l'eau,
- Précision dans l'application de l'eau,
- Réduction des coûts de main-d'œuvre,
- Adaptabilité à différents types de sols.

##### **❖ Inconvénients :**

- Nécessite un investissement élevé,
- Sensibilité à la qualité de l'eau.,
- Besoin en expertise technique,
- Moins adapté aux grandes surfaces. [14]

#### **V.4 Irrigation par aspersion :**

Ce système arrose les plantes grâce à une pluie artificielle, l'eau sous pression est amenée à la parcelle par des canalisations ; l'aspersion est réalisée grâce à des asperseurs rotatifs que l'on appelle "sprinklers". Ce type d'irrigation convient à toutes les cultures. L'avantage de l'aspersion est de s'adapter à presque tous les types de sols et presque tous les types de cultures. [14]

**V.4.1 Installations mobiles :**

- **Irrigation par enrouleur** : un canon d'arrosage est entraîné automatiquement sur une ligne grâce à un tuyau flexible enroulé sur une bobine motorisée.
- **Irrigation par pivot central** : une structure métallique tourne autour d'un point fixe, arrosant en cercle. Idéal pour les grandes surfaces agricoles.
- **Rampes frontales** : similaires au pivot, mais se déplacent en ligne droite ; adaptées aux parcelles rectangulaires. [14]



**Figure V.4 : Irrigation par enrouleur**



**Figure V.5 : Irrigation par rampe frontale**

### V.4.2 Avantages et inconvénients de l'irrigation par aspersion :

#### ❖ Avantages :

- Répartition homogène de l'eau, avec dosage contrôlé,
- Moins d'érosion que l'irrigation gravitaire,
- Compatible avec la fertigation (apport d'engrais avec l'eau),
- Réduction de la main-d'œuvre grâce à l'automatisation,
- Efficacité hydrique de 75 à 85 % dans les systèmes bien conçus.

#### ❖ Inconvénients :

- Investissement initial élevé,
- Pertes par évaporation surtout en cas de vent ou de forte chaleur,
- Maintenance régulière requise, notamment pour les buses et les filtres. [14]

### V.5 Choix des techniques d'irrigation adaptées à la zone d'étude

En milieu aride, le choix des techniques d'irrigation doit répondre à des défis spécifiques : rareté de l'eau, forte évaporation, et conditions climatiques extrêmes. Pour optimiser l'efficacité hydrique, les méthodes sont recommandées en fonction des cultures :

- **Pour les cultures maraîchères et céréalières** : l'irrigation par aspersion représente la technique la plus recommandée.

### V.6 Conclusion :

Lors d'un aménagement hydro-agricole, le choix de la technique d'irrigation en milieu aride est très important pour optimiser les ressources en eau.

Au terme de cette analyse comparative des différentes techniques d'irrigation, notre étude recommande l'adoption combinée de deux systèmes complémentaires pour répondre aux spécificités de notre zone d'étude :

- Le système goutte à goutte pour l'arboriculture.
- Le système par aspersion pour les cultures céréalières et maraîchères.

# **Chapitre VI**

## **Dimensionnement à la parcelle**

## Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle

### VI.1 Introduction

Le choix de la technique d'irrigation est un élément clé dans l'élaboration d'un schéma d'aménagement hydraulique.

Ce chapitre se concentre sur le dimensionnement des systèmes d'irrigation à la parcelle, en fonction de la méthode adoptée par les irrigants. Il prendra en compte les exigences techniques et les impacts de chaque méthode, qu'il s'agisse de l'aspersion et le goutte-à-goutte. De plus, ce dimensionnement doit être adapté aux critères agronomiques, aux contraintes spécifiques de la zone étudiée et aux besoins réels des cultures, afin d'assurer une gestion optimale et durable de l'irrigation.

### VI.2 Dimensionnement d'un réseau d'irrigation Goutte à goutte

#### VI.2.1 Données générales :

Le réseau d'irrigation goutte à goutte sera installé sur l'îlot n°21, alimenté par la borne n°21, où la pression disponible calculée est de l'ordre de 2,5 bars.

La surface de l'exploitation est de 0.8 hectares, constituée d'une seule parcelle de forme relativement rectangulaire. La pression disponible permet de garantir largement le bon fonctionnement du système d'irrigation sur toute la superficie concernée.

❖ Culture : Tomate.

- Espacement entre plants sur la ligne : 0.8 m,
- Espacements entre ramps : 1.50 m,
- Besoins de pointe 264 mm (Mai).

❖ Caractéristique du gouteur

- Débit nominal : 2 l/h,
- Pression nominale : 10 m.c.e,
- Espacement des gouteurs : 0.8 m.

## VI.2.2 Besoins d'irrigation des cultures en irrigation localisée :

### VI.2.2.1 Influence du taux de couverture du sol :

L'irrigation localisée est utilisée principalement pour les vergers et les cultures en ligne où une partie seulement de la surface est occupée par les plantes. On doit donc, pour calculer les besoins en eau en irrigation localisée, appliquer un coefficient de réduction  $K_r$ .

Bien que l'estimation de ce coefficient soit faite par l'utilisation de l'une des formules suivantes :

- (Keller & Karmeli, 1974)

$$K_r = \frac{C_s}{0.85} \dots\dots\dots(VI.1)$$

- Decroix, CTGREF

$$K_r = 0.1 + C_s \dots\dots\dots(VI.2)$$

Avec :

$C_s$  : taux de couverture du sol par la culture 60%.

À partir de cette valeur, on peut calculer le coefficient de réduction  $K_r$  selon différentes formules :

- $K_r = 0.71$  selon Keller et Karmeli
- $K_r = 0.7$  selon Decroix, CTGREF [15]

On prend  $K_r = 0,7$  car cette valeur offre une marge de sécurité fiable, tout en évitant de sous-estimer les besoins en eau, ce qui garantit ainsi une irrigation adéquate et adaptée à la culture.

Donc :

$$B_{jl} = B_j * K_r \dots\dots\dots(VI.3)$$

On trouve

$$B_{jl} = 5.96 \text{ mm/j}$$

### VI.2.2.2 Dose nette pratique

Après avoir évalué les besoins journaliers en eau, on calcule la part de sol à humidifier dans la zone racinaire afin de déterminer la dose nette d'irrigation (RFU), exprimée en hauteur d'eau utile pour la plante  $P$  :

$$D_p = (H_{cc} - H_{pf}) * Y * Z * d_a * P\% \dots\dots\dots(VI.4)$$

Avec :

- **hcc** : humidité à la capacité au champ,
- **hpf** : humidité au point de flétrissement,
- **Z** : profondeur explorée par les racines,
- **Y** : coefficient dépendant du type de sol (**généralement 2/3**),
- **Da** : densité apparente du sol,
- **P** : Pourcentage du sol humidifié.

$$P\% = \frac{n \cdot Spd \cdot Sh}{Sa \cdot Sr} \dots\dots\dots(VI.5)$$

- **N** : Nombre de goutteurs de distribution par plant = 1
- **Spd** : Distance entre deux points de distribution voisins du meme plant =(0,8m)
- **Sh** : Largeur de la bande humidifiée = 0.5m ;
- **Sr** : Écartement entre rangs des plants (0,8m) ;
- **Sp** : espacement des plants sur les rangs (1.5m).

On trouve P=33% et D<sub>p</sub> = 46.7mm

### VI.2.2.3 Fréquence des arrosages (Fr jours)

La fréquence d'arrosage (Tr) est déterminée par de la formule suivante :

$$Tr = \frac{\text{Dose nette}}{B_{pl}} \dots\dots\dots(VI.6)$$

$$Tr = \frac{46.7}{6} = 7.78 \text{ jours}$$

On prend Tr = 7 jours.

### VI.2.2.4 La dose brute réelle :

La dose brute est déterminée à partir de la nouvelle dose pratique compte des pertes liées à l'efficacité du réseau et à l'uniformité de distribution. On utilise la formule suivante :

$$\text{Dose brute} = \frac{B_{pl} \times Tr}{Eff \times Cu} \dots\dots\dots(VI.7)$$

Où :

- **Eff** : représente l'efficacité du réseau d'irrigation (90 %),
- **Cu** : est le coefficient d'uniformité de l'arrosage (90 %).

$$\text{Dose brute} = \frac{B_{pl} \times Tr}{Eff \times Cu} = \frac{5.96 \times 8}{0.9 \times 0.9} = 51.85mm$$

### VI.2.2.5 Durée de fonctionnement par d'arrosage

$$\theta = \frac{Dbr * Sa * Sr}{n * Q_g} \dots\dots\dots(VI.8)$$

- **Sr** : Écartement entre rangs des plants,
- **Sa** : espacement des plants sur les rangs,
- **n** : nombre du goutteur,
- **Qg** : nombre du goutteur.

$$\theta = \frac{51.85 * 1.5 * 0.8}{1 * 2} = 31 \text{ heures}$$

### VI.3 Calculs hydrauliques :

- Surface : 1 ha,
- Longueur de la rampe : 80 m,
- Largeur de la porte rampe : 100 m.

#### VI.3.1 Variation maximale du débit selon la règle de Christiansen :

Dans un réseau de goutte-à-goutte, pour assurer une distribution uniforme de l'eau, la variation maximale du débit entre les goutteurs ne doit pas dépasser 10 %. Cette exigence repose sur la loi de fonctionnement des goutteurs, définie par la relation suivante :

$$q = K \cdot H^x \dots\dots\dots(VI.9)$$

- **q** : débit du goutteur (L/h)
- **H** : pression en mCE (mètre de colonne d'eau)
- **K** : constante caractéristique du goutteur
- **x** : coefficient de sensibilité à la pression, généralement **x = 0,5**

D'après cette relation, la variation relative de débit s'exprime par :

$$\frac{\Delta q}{q} = x \cdot \frac{\Delta H}{H} \dots\dots\dots(VI.10)$$

En imposant une variation de débit de 10 % maximum, on en déduit la variation de pression admissible :

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{0.1}{x} = \frac{0.1}{0.5} = 0.20 \Rightarrow \Delta H_{\max} = 20\% \text{ de la pression moyenne}$$

La perte de charge totale autorisée (2 mCE) est répartie comme suit :

- **Perte de charge singulière (coudes, vannes, raccords, etc.) :**

$$\Delta H_{\text{singulière}} = 0.2 \text{ mCE}$$

- **Perte de charge linéaire (dans les conduites) :**

$$\Delta H_{\text{linéaire}} = 2 - 0.8 = 1.8 \text{ mCE}$$

Cette perte linéaire est ensuite répartie entre :

- **Les rampes :**

$$\frac{2}{3} * 1.8 = 1.20 \text{ mCE}$$

- **Le porte-rampe :**

$$\frac{1}{3} * 1.8 = 0.6 \text{ mCE}$$

### VI.3.2 Dimensionnement des canalisations du réseau :

Pour dimensionner les conduites de notre réseau d'irrigation, on pose que :

- **Rampes d'irrigation :** en PEBD (polyéthylène basse densité).
- **Porte-rampes :** peuvent être en polyéthylène haute densité (PEHD).

Les diamètres des conduites sont déterminés à l'aide des formules suivantes :

- **Pour la rampe :**

$$\varnothing_{r(\text{cal})} = \left( \frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(r)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} \dots \dots \dots (VI.11)$$

- **Pour le porte-rampe :**

$$\varnothing_{Pr(\text{cal})} = \left( \frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(Pr)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} \dots \dots \dots (VI.12)$$

Avec :

- **PDC :** perte de charge admissible (mCE),
- **Q :** débit (en L/h),
- **L :** longueur de la conduite (en m),
- **Ø :** diamètre calculé de la conduite (en mm).

#### VI.3.2.1 Le nombre de plantes par rampe :

On utilise la formule ci-dessous pour déterminer le nombre de plantes par rampe :

$$N_p = \frac{l_r}{s_a} \dots \dots \dots (VI.13)$$

- **N<sub>p</sub> :** nombre de plantes
- **L<sub>r</sub> :** longueur de la rampe

- $S_a$  : espacement des plants sur la rampe.

$$N_p = \frac{l_r}{s_a} = \frac{80}{0.8} = 100$$

### VI.3.3 Nombre des goutteurs par rampe :

On a un seul goutteur par plante, donc le nombre de goutteurs par rampe est égal au nombre de plantes.

$$N_g = N_p = 100 \text{ goutteurs}$$

- $N_g$  : nombre de goutteurs,
- $N_p$  : nombre de plantes

#### VI.3.3.1 Débit de la rampe :

Pour déterminer le débit de la rampe, on utilise la formule suivante :

$$Q_r = N_g * Q_g \dots \dots \dots (VI.14)$$

- $Q_r$  : débit de la rampe,
- $N_g$  : nombre de goutteurs,
- $Q_g$  : Débit de goutteur.

$$Q_r = N_g * Q_g = 100 * 2 = 200 \text{ l/h}$$

#### VI.3.3.2 Diamètre calculé de la rampe :

L'évaluation des diamètres des conduites se fait en utilisant les formules ci-dessous :

$$\varnothing_{r(cal)} = \left( \frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(r)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} \dots \dots \dots (VI.15)$$

Avec :

- **PDC** : perte de charge admissible (mCE),
- **Q** : débit (en L/h),
- **L** : longueur de la conduite (en m),
- **Ø** : diamètre calculé de la conduite (en mm).

$$\varnothing_{r(cal)} = \left( \frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(r)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = \left( \frac{1.2 \times 2.75}{0.478 \times 200^{1.75} \times 80} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = 11.8 \text{ mm}$$

On normalise D = 16 mm.

**VI.3.3.3 Nombre de rampes :**

Pour déterminer le nombre de rampe, on utilise la formule suivante :

$$N_r = \frac{l_{pr}}{S_r} \dots\dots\dots(VI.16)$$

- $N_r$  : nombre de rampes,
- $l_{pr}$  : longueur de la porte rampe,
- $S_r$  : espacement entre rampes.

$$N_r = \frac{l_{pr}}{S_r} = \frac{100}{1.5} = 66 \text{ rampes}$$

**VI.3.3.4 Débit de la porte rampe :**

Le débit de la porte rompe est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Q_{pr} = N_r * Q_r = 66 * 200 = 132000 \text{ l/h} \dots\dots\dots(VI.17)$$

- $Q_{pr}$  : débit de la porte rompe,
- $N_r$  : nombre de rampes,
- $Q_r$  : débit total de la rampe.

**VI.3.3.5 Diamètre calculé de la porte rampe :**

L'évaluation de diamètre de la porte rampe se fait en utilisant les formules ci-dessous :

$$\emptyset_{Pr(cal)} = \left( \frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(Pr)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} \dots\dots\dots(VI.18)$$

Avec :

- **PDC** : perte de charge admissible (mCE),
- **Q** : débit (l/h),
- **L** : longueur de la conduite (m),
- **Ø** : diamètre calculé de la conduite (mm).

$$\emptyset_{Pr(cal)} = \left( \frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(Pr)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = \left( \frac{0.6 \times 2.75}{0.478 \times 16000^{1.75} \times 90} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = 64.55 \text{ mm}$$

On normalise D = 90mm.

**VI.3.4 Vérification des pertes de charges :**

Après le choix des diamètres des conduites (rampe et porte-rampe), on procède à la vérification des pertes de charge à l'aide de la formule de Hazen-Williams, pour un diamètre de 16 mm pour la rampe et 90mm pour la porte rampes.

Les pertes de charge sont calculées par la formule de Hazen-Williams :

$$\Delta H_L = \left( \frac{3.592}{CH_W} \right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}} * Q^{1.852} \dots\dots\dots(VI.18)$$

- $\Delta H_L$  : Perte de charge en m,
- $CH_W$  : Coefficient de Hazen-Williams = 130,
- $L$  : Longueur de la conduite,
- $D$  : Diamètre de la conduite,
- $Q$  : Le débit de porte ramp.

Le tableau ci-dessous présente les pertes de charge au niveau de la rampe et de la porte-rampe.

**Tableau VI.1** : Les pertes de charge au niveau de la rampe et de la porte-rampe.

| Conduite               | L (m) | D <sub>N</sub> (mm) | Q (l/s) | $\Delta H_L$ (m) |
|------------------------|-------|---------------------|---------|------------------|
| <b>La rampe</b>        | 80    | 16                  | 0.06    | 0.88             |
| <b>La porte rampes</b> | 100   | 90                  | 3.67    | 0.43             |
| <b>Tete de secteur</b> | 10    | 90                  | 3.67    | 0.04             |
| <b>Total</b>           | /     | /                   | /       | 1.35             |

Les pertes de charge totale sont de l'orde de 1.35m donc inférieur a 1.8m restent dans les limites admises par la règle de Christiansen.

**VI.4 Dimensionnement d'un réseau d'irrigation par aspersion :****VI.4.1 Données générales :**

Pour mettre en place le système d'irrigation par aspersion, nous avons choisi de travailler sur la parcelle n°1 de l'îlot n°1, d'une superficie de 0.96 hectare qui possède les caractéristiques suivantes :

- Superficie : 0.96 Ha,
- Longueur : 120m,
- Largeur : 80m,
- Alimentation en eau : Borne N°1,
- Pression disponible : 32.95 bars,
- Perméabilité de sol : 15 mm/h.

Dans notre cas, nous avons choisi la culture de la pomme de terre, qui présente un besoin en eau de pointe de 116,26 mm.

**VI.4.2 Calcul de la dose pratique :**

Pour déterminer la dose pratique d'irrigation, on utilise la formule suivante :

$$D_p = (H_{cc} - H_{pf}) * Y * Z * d_a \dots \dots \dots (VI.19)$$

Avec :

- **hcc** : humidité à la capacité au champ,
- **hpf** : humidité au point de flétrissement,
- **Z** : profondeur explorée par les racines,
- **Y** : coefficient dépendant du type de sol,
- **Da** : densité apparente du sol.

Donc :

$$D_p = 60 \text{ mm}$$

**VI.4.3 Dimensionnement de l'asperseur****VI.4.3.1 Choix du diamètre de la buse :**

Pour choisir le diamètre de la buse, il faut s'assurer que la pluviométrie de l'asperseur reste inférieure à la capacité d'infiltration du sol, qui est de 15 mm/h.

En se référant à la fiche technique actualisée de l'asperseur Perrot, nous avons obtenu une buse de 4,5 mm de diamètre, fonctionnant à une pression de 2,5 bars.

### VI.4.3.2 Calcul de la portée :

La portée d'un asperseur correspond à la distance maximale jusqu'où l'eau peut être projetée efficacement. Elle dépend principalement du diamètre de la buse et de la pression disponible à sa sortie. Pour estimer cette portée, on utilise la formule suivante :

$$L = 3 \times d^{0.5} \times H^{0.25} \dots\dots\dots(VI.20)$$

Où :

- **L** : la portée en mètres,
- **d** : diamètre de la buse en millimètres,
- **H** : la pression à la buse, exprimée en mètres de colonne d'eau.

Dans notre cas, nous avons choisi un diamètre de buse de 4.5 mm et une pression de 2.5 bars. En appliquant la formule, on obtient  $L = 14.23\text{m}$  on prend  $L = 14.5$ .

### VI.4.4 Calcul des écartements :

Notre zone, soumise à des vents forts, il est important d'adapter l'espacement des arroseurs pour garantir une bonne répartition de l'eau. Selon les normes américaines, on recommande dans ce cas :

- Un écartement entre les lignes d'arrosage : ( $E_l$ ) de  $1,02 \times L$ ,
- Et un écartement entre les arroseurs sur la même rampe : ( $E_a$ ) de  $0,6 \times L$ .

Avec une portée  $L = 14,5\text{ m}$ , on obtient :

- $E_l = 14.79\text{ m}$ ,
- $E_a = 8.7\text{ m}$ .

On normalise :  $E_l=12\text{ m}$ ,  $E_a=12\text{m}$ , Ces valeurs assurent une couverture efficace malgré le vent.

### VI.4.5 Vérification de la pluviométrie de la buse :

La pluviométrie d'un asperseur, c'est-à-dire la quantité d'eau qu'il applique par unité de surface, se calcule avec la formule suivante :

$$P_{asp} = \frac{q_{asp}}{E_a \times E_L} \dots\dots\dots(VI.21)$$

Où :

- $E_a$  : l'écartement entre les asperseurs sur une même rampe,
- $E_l$  : l'écartement entre les rampes,
- $q_{asp}$  : le débit de l'asperseur qui est calculé par la formule suivante.

$$q_{asp} = 0.95 \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \sqrt{2 \times g \times H} \dots\dots\dots (VI.22)$$

Donc :  $q_{asp} = 1.14 \text{ m}^3/\text{h}$  et  $P = 7.9 \text{ mm/h}$

La pluviométrie de l'asperseur calculée  $P$  reste inférieure à la perméabilité du sol ( $K = 15 \text{ mm/h}$ ), ce qui garantit une bonne infiltration sans risque de ruissellement.

#### VI.4.6 Détermination des paramètres d'arrosages :

##### VI.4.6.1 Calcul du tour d'eau :

Le tour d'eau représente la durée nécessaire pour irriguer l'ensemble des parcelles. Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$Tr = \frac{\text{Dose nette} \times N_j}{B_{mp}} \dots\dots\dots (VI.23)$$

Avec :

- $B_{mp}$  : le besoin en eau du mois de pointe pour la pomme de terre, soit  $116.26 \text{ mm}$  ;
- $N_j$  : le nombre de jours disponibles pour l'irrigation dans le mois, soit  $26$  jours.

$$Tr = \frac{\text{Dose nette} \times N_j}{B_{mp}} = \frac{60 \times 26}{116.26} = 13.41$$

Donc :

On prend  $Tr=10j$ , Donc on irrigue 3 fois par mois.

##### VI.4.6.2 Calcul de la dose réelle brute

La dose brute correspond à la quantité d'eau qu'il faut réellement apporter à la parcelle, en tenant compte des pertes sur le réseau d'aspersion.

Elle se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$D_{brute} = \frac{D_r}{E_{ff}} = \frac{B_{mp}}{\text{Nombre d'irrigation par moi} \times E_{ff}} \dots\dots\dots (VI.24)$$

Avec :

- $E_{ff}$  : efficacité de l'aspersion qui est égale à  $75\%$ .

$$D_{brute} = \frac{116.26}{3 \times 0.75} = 51.67 \text{ mm}$$

#### VI.4.6.3 Temps d'arrosage :

Le temps d'arrosage correspond à la durée nécessaire pour appliquer la dose brute d'eau par chaque asperseur, sans dépasser la capacité d'infiltration du sol.

Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$T = \frac{D_{brute}}{\text{pluviométrie}} = \frac{51.67}{7.9} = 6.52 \text{ heures} \dots\dots\dots (\text{VI.25})$$

On prend  $T = 7$  heures.

#### VI.4.6.4 Calcul du débit d'équipement ( $Q_{eq}$ ) :

Le débit d'équipement ( $Q_{eq}$ ) représente le débit nécessaire pour répondre aux besoins en eau de la parcelle durant la période de pointe. Il se calcule selon la formule suivante :

$$Q_{eq} = \frac{S \times B_{mp} \times 10}{T \times n \times N_j \times E_{ff}} \dots\dots\dots (\text{VI.26})$$

Avec :

- $Q_{eq}$  : débit d'équipement ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),
- $S$  : surface de la parcelle (ha),
- $B_{mp}$  : besoin net en eau du mois de pointe (mm),
- $T$  : durée du tour d'eau (heures),
- $n$  : nombre de positions d'un asperseur,
- $N_j$  : nombre de jour,
- $E_{ff}$  : efficacité du système d'irrigation (75%).

$$Q_{eq} = \frac{S \times B_{mp} \times 10}{T \times n \times N_j \times E_{ff}} = \frac{1 \times 116.26 \times 10}{7 \times 2 \times 26 \times 0.75} = 4.26 \text{ m}^3/\text{h}$$

#### VI.4.7 Calcul hydraulique des rampes et la porte rampe :

##### VI.4.7.1 Calcul de la longueur du la rampe :

Pour une bonne couverture d'irrigation, les asperseurs sont installés en laissant un demi-écartement ( $Ea/2$ ) de chaque côté de la parcelle. Cela permet d'éviter les zones en dehors de la surface utile à irriguer.

La formule utilisée est la suivante :

$$L_r = \text{Largeur du terrain} - \frac{E_a}{2} \dots\dots\dots(\text{VI.27})$$

Avec :

- $L_r$  : longueur de la rampe (en mètres)
- $E_a$  : écartement entre les asperseurs sur une même rampe (en mètres)

$$L_r = 80 - \frac{12}{2} = 74 \text{ m}$$

#### VI.4.7.2 Nombre des asperseurs par rampe :

Le nombre d'asperseurs installés sur une rampe dépend de la longueur de la rampe ( $L_r$ ) et de l'écartement entre les asperseurs ( $E_a$ ). On utilise la relation suivante :

$$N_{asp} = \frac{L_r}{E_a} \dots\dots\dots(\text{VI.29})$$

- $N_{asp}$  : nombre d'asperseurs,
- $L_r$  : longueur de la rampe (m),
- $E_a$  : écartement entre les asperseurs sur une même rampe (m).

$$N_{asp} = \frac{L_r}{E_a} = \frac{76}{12} = 6.17$$

On prend  $N_{asp} = 6$  asperseurs.

#### VI.4.7.3 Débit ds rampe :

Le débit de la rampe correspond à la somme des débits de tous les asperseurs installés sur cette rampe. On utilise la relation suivante :

$$Q_r = q_{asp} \times N_{asp} \dots\dots\dots(\text{VI.30})$$

Avec :

- $Q_r$  : débit de la rampe ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
- $q_{asp}$  : débit d'un seul asperseur ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) donné par la fiche technique de l'asperseur de type Perrot
- $N_{asp}$  : nombre d'asperseurs installés sur une rampe

$$Q_r = 1.14 \times 6 = 6.84 \text{ m}^3/\text{h}$$

**VI.4.7.4 Diamètre de la rampe :**

Pour déterminer le diamètre intérieur nécessaire pour assurer le bon fonctionnement hydraulique de la rampe, on utilise la formule suivante :

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} \dots\dots\dots(\text{VI.31})$$

Avec :

- **D<sub>r</sub>** : diamètre intérieur de la conduite (m),
- **Q<sub>r</sub>** : débit de la rampe (m<sup>3</sup>/s),
- **V** : vitesse admissible de l'eau dans la conduite (en m/s), ici choisie égale à 1.5 m/s.

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} = \sqrt{\frac{4 \times (\frac{1.14}{3600})}{\pi \times 1.5}} = 40.18 \text{ mm}$$

On normalise à D<sub>N</sub>=50 mm.

**VI.4.7.5 Calcul du la longueur du porte rampe :**

Pour déterminer la longueur du porte-rampe, on utilise la formule suivante :

$$L_{pr} = \text{Largeur du terrain} - \frac{E_r}{2} \dots\dots\dots(\text{VI.32})$$

- **L<sub>pr</sub>** : longueur de la porte rampe (m),
- **E<sub>r</sub>** : écartement entre les rampes (m).

$$L_{pr} = 120 - \frac{12}{2} = 114 \text{ m}$$

**VI.4.7.6 Nombre de rampes**

$$N_r = \frac{L_{pr}}{E_r} \dots\dots\dots(\text{VI.33})$$

- **N<sub>r</sub>** : nombre rampes,
- **L<sub>pr</sub>** : longueur de la porte rampe (m),
- **E<sub>r</sub>** : écartement entre les rampes (m).

$$N_{asp} = \frac{L_{pr}}{E_r} = \frac{114}{12} = 9.5$$

On prend N<sub>asp</sub>=9 rampes.

**VI.4.7.7 Débit du porte rampe :**

Nous travaillons avec une seule rampe

$$Q_{pr} = q_r \times N_r \dots\dots\dots (VI.34)$$

- $Q_{pr}$  : est le débit d'une rampe (en m<sup>3</sup>/s),
- $N_r$  : est le nombre de rampes alimentées par le porte-rampe.

$$Q_{pr} = q_r \times N_r = 6.84 \times 1 = 6.84 \text{ m}^3/\text{s}$$

**VI.4.7.8 Diamètre de la rampe :**

Pour déterminer le diamètre intérieur la porte rampe, on utilise la formule suivante :

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} \dots\dots\dots (VI.35)$$

Avec :

- $D_{pr}$  : diamètre intérieur de la conduite (m),
- $Q_r$  : débit de la porte rampe (m<sup>3</sup>/s),
- $V$  : vitesse admissible de l'eau dans la conduite (en m/s), ici choisie égale à 1.5 m/s.

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} = \sqrt{\frac{4 \times (\frac{1.14}{3600})}{\pi \times 1.5}} = 40.18 \text{ mm}$$

On normalise à  $D_N=68 \text{ mm}$ .

**VI.4.7.9 Vérification des pertes de charge de la rampe et le porte rampe :**

Après le choix des diamètres des conduites, on procède à la vérification des pertes de charge à l'aide de la formule de Hazen-Williams.

Les pertes de charge sont calculées par la formule de Hazen-Williams :

$$\Delta H_L = \left(\frac{3.592}{CH_w}\right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}} * Q^{1.852} \dots\dots\dots (VI.36)$$

- $\Delta H_L$  : Perte de charge en m,
- $CH_w$  : Coefficient de Hazen-Williams = 130,
- $L$  : Longueur de la conduite (m),
- $D$  : Diamètre intérieur (m),
- $Q$  : Le débit de ramp (m<sup>3</sup>/s).

Le tableau ci-dessous présente les pertes de charge au niveau de la rampe et de la porte-rampe et la tête de secteur.

**Tableau VI.2:** Les pertes de charge au niveau des conduites.

| Conduite        | L (m) | D <sub>N</sub> (mm) | Q (l/s) | ΔH <sub>L</sub> (m) |
|-----------------|-------|---------------------|---------|---------------------|
| La rampe        | 74    | 50                  | 1.73    | 1.60                |
| La porte rampes | 114   | 63                  | 1.73    | 0.70                |
| Tête de secteur | 10    | 63                  | 1.73    | 0.06                |
| Total           | /     | /                   | /       | 2.36                |

Les pertes de charge totale sont de l'ordre de 2.36 m donc inférieur à 4.5 m restent dans les limites admises par la règle de Christiansen.

### VI.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié deux systèmes d'irrigation adaptés à deux cultures : le goutte-à-goutte pour la tomate et l'aspersion pour la pomme de terre. Le dimensionnement hydraulique a permis de déterminer les débits, les diamètres des conduites, ainsi que les paramètres d'arrosage nécessaires. Une attention particulière a été portée au calcul des pertes de charge pour assurer un fonctionnement optimal du réseau.

Le choix d'asperseurs (buses de 4,5 mm fonctionnant à 2,5 bars) garantit une bonne répartition de l'eau. L'adoption de ces techniques permet une gestion efficace de l'eau et contribue à l'amélioration des rendements agricoles.

# **Chapitre VII**

## **Calcul technico-économique**

## Chapitre VII : Calcul technico-économique

### VII.1 Introduction :

Avant de lancer un projet d'aménagement hydro-agricole, il est essentiel d'en estimer le coût de manière précise. Cela permet non seulement de s'assurer de sa faisabilité, mais aussi d'évaluer sa rentabilité sur le court et le long terme.

Dans ce chapitre, nous allons estimer les coûts liés à l'aménagement du périmètre de Tarrouma, qui s'étend sur une superficie de 150 hectares. Cette estimation nous donne une idée concrète de l'investissement nécessaire pour réaliser un tel projet.

Pour cela, nous avons identifié les principaux travaux à prévoir :

- **Lot 1** : Réalisation du réseau d'adduction et de distribution, avec ses pièces spéciales ;
- **Lot 2** : Mise en place du système de pompage
- **Lot 3** : Construction du bassin d'aspiration et des équipements associés.

### VII.2 Les phases d'installation du réseau d'adduction et de distribution :

Pour garantir une installation correcte des conduites tout en limitant les impacts environnementaux et en assurant la sécurité du réseau, plusieurs étapes doivent être respectées :

#### ❖ Creusement de la tranchée

La première étape consiste à réaliser des fouilles dans le sol à l'aide d'une pelle mécanique. Les terres extraites (déblais) sont généralement déposées sur un côté de la tranchée, tandis que l'autre côté est réservé au stockage et au bardage des conduites à poser.

#### ❖ Mise en place d'un lit de sable

Avant de poser les tuyaux, un lit de sable est étalé au fond de la tranchée. Dans notre cas, ce lit a une épaisseur de 14 cm. Il sert à amortir les charges et à protéger la conduite contre les aspérités du sol.

#### ❖ Pose des conduites

Les tuyaux sont d'abord contrôlés visuellement afin d'écarter ceux qui pourraient être endommagés. Ils sont ensuite descendus avec précaution dans la tranchée à l'aide d'un engin de levage. Une attention particulière est portée à leur alignement pour faciliter le raccordement.

### ❖ Essais de pression et de joints

Avant de procéder au remblayage, il est impératif de tester la résistance des conduites et l'étanchéité des joints. L'essai consiste à remplir les tuyaux d'eau sous une pression équivalente à 1,8 fois la pression normale de service, pendant environ 30 minutes, sans que la pression ne varie de plus de 0,2 bar.

### ❖ Pose d'un grillage avertisseur

Un grillage avertisseur est posé au-dessus des conduites, à une certaine profondeur, pour signaler la présence du réseau en cas de futurs travaux de terrassement. Cette étape est essentielle pour prévenir les dommages accidentels.

### ❖ Remblaiement

Une fois les essais concluants, la tranchée est rebouchée à l'aide des déblais extraits. Cette opération doit se faire progressivement pour ne pas déplacer les conduites.

### ❖ Transport des terres excédentaires

Les déblais non réutilisables ou en excès sont évacués vers une zone de dépôt autorisée. Ce transport permet de garder la surface de travail propre et de respecter les normes environnementales.

### ❖ Nivellement et compactage

Après le remblai, le terrain est nivelé afin de retrouver un sol stable. Un compactage est ensuite réalisé pour resserrer les particules du sol, améliorer sa cohésion et garantir la stabilité.

## VII.3 Volumes de terrassement

### VII.3.1 Dimensions de la tranchée

#### ❖ Largeur de la tranchée

La largeur du fond de la tranchée dépend directement du diamètre de la conduite à poser. Elle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$B = D + 0,6 \dots \dots \dots (VII.1)$$

Avec :

- **B** : largeur du fond de la tranchée (en mètres),
- **D** : diamètre extérieur de la conduite (en mètres).

❖ **Profondeur de la tranchée :**

La profondeur de la tranchée doit être choisie pour permettre une pose correcte des conduites, faciliter les raccordements et éviter les conflits avec d'autres réseaux souterrains.

$$H_{tr} = e + D + h \dots \dots \dots (VII.2)$$

Avec :

- **H<sub>tr</sub>** : profondeur totale de la tranchée (m),
- **e** : épaisseur du lit de pose sous la conduite (0.1m-0.2m),
- **D** : diamètre extérieur de la conduite (m),
- **h** : épaisseur du remblai au-dessus de la conduite (m).

❖ **Surface vertical :**

La surface verticale représente la surface du profil en travers d'excavation. Elle est estimée à l'aide de la formule suivante :

$$S_{vtr} = H_{tr} \times B \dots \dots \dots (VII.3)$$

Avec :

- **S<sub>vtr</sub>** : surface verticale de la tranchée (m<sup>2</sup>),
- **H<sub>tr</sub>** : profondeur de la tranchée (m),
- **B** : largeur du fond de la tranchée (m).

❖ **Surface horizontal :**

La surface horizontale correspond à la projection au sol de la tranchée, autrement dit, la surface du fond plat de la fouille. Elle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$S_{htr} = L_{tr} \times B \dots \dots \dots (VII.4)$$

Avec :

- **S<sub>htr</sub>** : surface horizontale de la tranchée (m<sup>2</sup>)
- **L<sub>tr</sub>** : longueur de la tranchée (m)
- **B** : largeur du fond de la tranchée (m)

❖ **Volume de la tranchée :**

Pour estimer le volume de terre à extraire lors des travaux d'excavation d'une tranchée, on utilise la formule suivante :

$$V_{tr} = S_{tr} \times L \dots \dots \dots (VII.5)$$

Avec :

- $V_{tr}$  : volume de la tranchée (en  $m^3$ )
- $S_{tr}$  : section de la tranchée (en  $m^2$ )
- $L$  : longueur totale de la tranchée (en m)

Le calcul des volumes de déblais, de sable et de remblais relatifs au réseau de distribution est récapitulé dans le tableau VII.1 ci-dessous :

**Tableau VII.1** : Calcul des différents volumes.

| Tubes enterrés | Longueur (m) | Largeur (m) | Hauteur (m) | Surface vertical | Surface horizontal | Déblai ( $m^3$ ) | Sable ( $m^3$ ) | Conduites ( $m^3$ ) | Remblai ( $m^3$ ) | Transport des terres |
|----------------|--------------|-------------|-------------|------------------|--------------------|------------------|-----------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| Ø75            | 184.89       | 0.68        | 1.18        | 0.89             | 124.80             | 146.6            | 12.5            | 0.8                 | 133.3             | 13.3                 |
| Ø90            | 1051.48      | 0.69        | 1.19        | 0.93             | 725.52             | 863.4            | 72.6            | 6.7                 | 784.1             | 79.2                 |
| Ø110           | 1343.20      | 0.71        | 1.21        | 0.96             | 953.67             | 1153.9           | 95.4            | 12.8                | 1045.8            | 108.1                |
| Ø125           | 1223.82      | 0.73        | 1.23        | 0.99             | 887.27             | 1086.9           | 88.7            | 15.0                | 983.2             | 103.7                |
| Ø160           | 1392.90      | 0.76        | 1.26        | 1.12             | 1058.60            | 1333.8           | 105.9           | 28.0                | 1200.0            | 133.9                |
| Ø200           | 930.53       | 0.80        | 1.30        | 1.18             | 744.42             | 967.8            | 74.4            | 29.2                | 864.1             | 103.7                |
| Ø225           | 59.17        | 0.85        | 1.35        | 1.30             | 50.29              | 67.9             | 5.0             | 2.9                 | 60.0              | 7.9                  |
| Ø315           | 124.93       | 0.92        | 1.42        | 1.39             | 114.31             | 161.7            | 11.4            | 9.7                 | 140.6             | 21.2                 |
| Ø350           | 206.32       | 0.97        | 1.47        | 1.53             | 200.54             | 295.2            | 20.1            | 22.4                | 252.7             | 42.5                 |
| Ø400           | 175.17       | 1.02        | 1.52        | 1.66             | 179.02             | 272.5            | 17.9            | 24.5                | 230.1             | 42.4                 |
| Ø500           | 1217.25      | 1.12        | 1.62        | 1.93             | 1365.75            | 2215.3           | 136.6           | 260.4               | 1818.3            | 396.9                |
| <b>Total</b>   |              |             |             |                  | 6404.22            | 8565.0           | 640.42          | 412.39              | 7512.2            | 1052.81              |

### VII.3.2 Evaluation du cout des travaux de terrassement :

Lors de l'estimation des coûts des travaux, il est important de prendre en compte plusieurs éléments essentiels :

- Les travaux de terrassement (déblais et remblais),
- L'approvisionnement en matériaux (comme le lit de sable),
- Transport des terres excédentaires.

Le calcul des frais de terrassement se fait comme suit :

#### ❖ Déblais

Le coût des déblais est obtenu en multipliant le volume total à excaver par le prix unitaire :

$$F_{déblais} = V_{déblais} \times 400DA/m^3 \dots\dots\dots(VII.6)$$

#### ❖ Remblais

Le coût des remblais est calculé de la même manière, avec un prix unitaire plus élevé :

$$F_{remblais} = V_{remblais} \times 200DA/m^3 \dots\dots\dots(VII.7)$$

#### ❖ Lit de sable

Le coût correspondant est calculé selon le volume de sable utilisé.

$$F_{sable} = V_{sable} \times 2500DA/m^3 \dots\dots\dots(VII.8)$$

#### ❖ Transport des terres

Le coût correspondant est calculé selon le volume des terres excédentaires utilisées.

$$F_{Tdt} = V_t \times 400DA/m^3 \dots\dots\dots(VII.9)$$

#### ❖ Nivellement et compactage

Le coût de nivellement est calculé selon La surface horizontale sol de la tranchée.

$$F_N = S_{htr} \times 150DA/ml \dots\dots\dots(VII.10)$$

L'ensemble de ces frais constitue le coût estimatif des travaux de terrassement, tel que présenté dans le tableau VII.2.

**Tableau VII.2 :** Le coût estimatif des travaux de terrassement.

| Type des travaux       | Unité de mesure | Quantités | Prix unitaire (DA) | Montant (DA) |
|------------------------|-----------------|-----------|--------------------|--------------|
| Déblais                | M <sup>3</sup>  | 9350.99   | 400.00             | 3 426 010.58 |
| Remblais               | M <sup>3</sup>  | 8272.50   | 200.00             | 1 502 443.62 |
| Sable                  | M <sup>3</sup>  | 646.25    | 2 500.00           | 1 601 054.55 |
| Transport des terres   | M <sup>3</sup>  | 1078.49   | 350.00             | 368 482.92   |
| Nivellement compactage | ML              | 6462.50   | 150.00             | 960 632.73   |
| <b>Prix total (HT)</b> |                 |           |                    | 7 858 624.40 |
| <b>TVA 19%</b>         |                 |           |                    | 1 493 138.64 |
| <b>Total TTC</b>       |                 |           |                    | 9 351 763.04 |

### VII.4 Evaluation des prix de pose des conduites :

Les coûts de pose des conduites de distribution sont présentés en détail dans le tableau VII.3.

**Tableau VII.3:** Estimation des coûts de mise en place des conduites.

| Diamètre | Linéaire | Nombre de conduites | Matériau | Prix/ML | Prix de Soudure | Grillage avertisseur | Montant (DA) |
|----------|----------|---------------------|----------|---------|-----------------|----------------------|--------------|
| Ø75      | 184.89   | /                   | PEHD     | 291.1   | /               | 18489                | 72 310.48    |
| Ø90      | 1051.48  | /                   | PEHD     | 494.8   | /               | 105148               | 625 420.30   |
| Ø110     | 1343.20  | /                   | PEHD     | 861.7   | /               | 134320               | 1 291 755.44 |

|      |         |     |       |        |          |                   |               |
|------|---------|-----|-------|--------|----------|-------------------|---------------|
| Ø125 | 1223.82 | 103 | PEHD  | 1029.8 | 950      | 122382            | 1 382 671.84  |
| Ø160 | 1392.90 | 117 | PEHD  | 1745.9 | 950      | 139290            | 2 571 154.11  |
| Ø200 | 930.53  | 79  | PEHD  | 3490.2 | 2 000.00 | 93053             | 3 340 788.81  |
| Ø250 | 59.17   | 6   | PEHD  | 4780.4 | 2 000.00 | 5917              | 288 773.27    |
| Ø315 | 124.93  | 11  | PEHD  | 10300  | 3 000.00 | 12493             | 1 299 272.00  |
| Ø350 | 206.32  | 18  | Fonte | 7516.6 | 3 500.00 | 20632             | 1 571 456.91  |
| Ø400 | 175.17  | 16  | Fonte | 8490   | 4 000.00 | 17517             | 1 504 710.30  |
| Ø500 | 1217.25 | 102 | Fonte | 10800  | 5 000.00 | 121725            | 13 268 025.00 |
|      |         |     |       |        |          | <b>Total (HT)</b> | 27 216 338.46 |
|      |         |     |       |        |          | <b>TVA 19%</b>    | 5 171 104.31  |
|      |         |     |       |        |          | <b>Total TTC</b>  | 32 387 442.76 |

### VII.5 Estimation du coût des pièces spéciales

Les prix des pièces spéciales sont détaillés dans le tableau VII.4

**Tableau VII.4:** Estimation du coût des pièces spéciales.

| Pièce                  | Quantité | Prix unitaire (DA) | Montant (DA) |
|------------------------|----------|--------------------|--------------|
| Borne A2               | 14       | 12 500             | 175 000      |
| Borne B                | 8        | 22 400             | 179 200      |
| Té                     | 21       | 1 230              | 25 830       |
| Vanne de sectionnement | 2        | 23 000             | 46 000       |
| Vanne                  | 10       | 10 890             | 108 900      |
| coude 90°              | 10       | 1 200              | 12 000       |
| <b>Prix total (HT)</b> |          |                    | 546 930      |
| <b>TVA 19%</b>         |          |                    | 103 916.7    |
| <b>Total TTC</b>       |          |                    | 650 846.7    |

### VII.6 Estimation des coûts du bassin d'aspiration et des pompes de refoulement

Les prix d'exécution du bassin d'aspiration ainsi que les pompes de refoulement sont détaillés dans le tableau VII.5.

**Tableau VII.5:** Estimation du coût du bassin d'aspiration, des pompes de refoulement.

| Types des travaux                 | Unité de mesure | Quantités | Prix unitaire (DA)     | Montant (DA) |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|------------------------|--------------|
| Déblais                           | M3              | 750       | 450                    | 337 500      |
| Géomembrane 1.2mm                 | M2              | 535       | 900                    | 481 500      |
| Fourniture de pose                | M2              | 535       | 100                    | 53 500       |
| Pompes                            | /               | 4         | 600 000                | 2 400 000    |
| Chambre pour l'armoire électrique | forfait         | 1         | 100 000                | 100 000      |
|                                   |                 |           | <b>Prix total (HT)</b> | 3 372 500    |
|                                   |                 |           | <b>TVA 19%</b>         | 640 775      |
|                                   |                 |           | <b>Total TTC</b>       | 4 013 275    |

### VII.7 Estimation du coût de forage

L'estimation du coût de forage est détaillée dans le tableau VII.6.

**Tableau VII.6:** Estimation du coût de forage.

| Désignation des travaux                | Unité | Quantité prévue au marché | Prix unitaire (DA) | Montant brut total des travaux (DA) |
|----------------------------------------|-------|---------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Amenée et repli du chantier            | Fft   | 1                         | 600 000            | 600 000                             |
| Construction plateforme bassin rigoles | U     | 1                         | 200 000            | 200 000                             |
| Construction de l'avant puits          | Ml    | 10                        | 45 000             | 450 000                             |
| Forage de reconnaissance 12''1/4       | Ml    | 446                       | 20 000             | 8 920 000                           |
| Amenée équipe de diagraphie            | Fft   | 1                         | 25 000             | 25 000                              |
| Enregistrement diagraphie              | Ml    | 446                       | 1 000              | 446 000                             |
| Essai de nappe à blanc                 | H     | 5                         | 20 000             | 100 000                             |
| Élargissement de 12''1/4 à 17''1/2     | Ml    | 300                       | 20 000             | 6 000 000                           |
| Travail en conditions anormales        | H     | 200                       | 10 000             | 2 000 000                           |
| F/P Tube Plein INOX 8"5/8 Ep. 5 mm     | Ml    | 70                        | 38 000             | 2 660 000                           |
| F/P Tube Crépiné JOHNSON 8"5/8 slot 20 | Ml    | 120                       | 40 000             | 4 800 000                           |
| Cône de raccordement 8"5/8 à 6''       | U     | 1                         | 60 000             | 60 000                              |

|                                              |                |     |                        |            |
|----------------------------------------------|----------------|-----|------------------------|------------|
| Mise en place massif filtrant                | m <sup>3</sup> | 30  | 12 000                 | 360 000    |
| Cimentation de l'espace annulaire            | m <sup>3</sup> | 5   | 20 000                 | 100 000    |
| Traitement à l'hexamétaphosphate             | kg             | 400 | 800                    | 320 000    |
| Traitement à l'acide chlorhydrique           | m <sup>3</sup> | 5   | 80 000                 | 400 000    |
| Développement du forage à air lift – avec FM | H              | 72  | 7 000                  | 504 000    |
| Développement sans FM                        | H              | 24  | 3 000                  | 72 000     |
| Chantier de pompage                          | Ft             | 1   | 100 000                | 100 000    |
| Pompage effectif (essai de débit)            | H              | 72  | 6 000                  | 432 000    |
| Observation remontée nappe                   | H              | 24  | 3 000                  | 72 000     |
| Analyse physico-chimique d'eau               | Ft             | 1   | 60 000                 | 60 000     |
| Réalisation d'une endoscopie                 | MI             | 446 | 1 000                  | 446 000    |
| Rapport fin de sondage                       | U              | 2   | 50 000                 | 100 000    |
| Fermeture du forage                          | Ft             | 1   | 40 000                 | 40 000     |
| Construction abri de forage                  | U              | 1   | 1 000 000              | 1 000 000  |
| Mur de clôture                               | MI             | 55  | 24 000                 | 1 320 000  |
|                                              |                |     | <b>Prix total (HT)</b> | 33 613 000 |
|                                              |                |     | <b>TVA 19%</b>         | 6 386 470  |
|                                              |                |     | <b>Total TTC</b>       | 39 999 470 |

### VII.8 Coût total de projet :

Le coût total du projet d'aménagement hydro-agricole inclut notamment l'adduction, assurée par quatre forages pour un montant estimé à deux cents millions de dinars, détaillés comme suit :

**Tableau VII.7:** Le coût total du projet.

| Travaux                        | Montant TTC (DA) |
|--------------------------------|------------------|
| <b>Travaux de terrassement</b> | 9 351 763.04     |
| <b>Pose des conduites</b>      | 32 387 442.76    |
| <b>Pièces spéciales</b>        | 650 846.70       |
| <b>Bassin d'aspiration</b>     | 4 013 275.00     |
| <b>4 Forages</b>               | 160 000 000.00   |
| <b>Coût total</b>              | 206 403 327.50   |

Le coût total de l'aménagement du périmètre est estimé à deux cent six millions quatre cent trois mille trois cent vingt-sept dinars (206 403 327,50 DA).

### **VII.9 Conclusion**

L'analyse technico-économique de l'aménagement hydro-agricole du périmètre de Tarrouma, couvrant une superficie de 150 hectares, a permis d'estimer le coût total de ce projet est de deux cent six millions quatre cent trois mille trois cent vingt-sept dinars et (206 403 327,50 DA).

Ce montant englobe l'ensemble des travaux nécessaires à la mise en œuvre du projet, notamment le terrassement, la pose du réseau de distribution, les pièces spéciales, le bassin d'aspiration, les pompes, ainsi que les travaux d'adduction réalisés à partir de quatre forages.

Le coût moyen par hectare s'élève ainsi un million trois cent soixante-seize mille vingt-deux dinars (1 376 022,18 DA/ha), fournissant une base claire pour évaluer la rentabilité et la viabilité économique du projet.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

L'aménagement hydro-agricole d'un périmètre exige une étude technique approfondie intégrant plusieurs disciplines : hydrogéologie, hydraulique, agronomie et économie. Cette approche permet d'optimiser l'utilisation des ressources en eau tout en assurant la durabilité des investissements agricoles.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons porté notre attention sur le périmètre de Tarrouma, situé dans la zone aride de Babār, au sud de la wilaya de Khenchela. Ce périmètre dispose de sols exploitables mais nécessite une gestion rationnelle de l'eau pour permettre un développement agricole efficace.

L'étude a conduit à la conception d'un système d'irrigation sous pression alimenté par quatre forages, un bassin d'alimentation et un système de pompage, assurant des pressions comprises entre 2,24 et 3,39 bars aux bornes d'irrigation. Ces pressions permettent l'adoption de systèmes performants comme l'aspersion et le goutte-à-goutte, adaptés aux conditions climatiques locales.

Le réseau d'adduction projeté vise à sécuriser l'alimentation en eau, à améliorer l'efficacité hydraulique du réseau et à créer les conditions techniques favorables à une intensification des cultures.

Ce projet représente un levier concret pour dynamiser et moderniser l'agriculture dans les zones sahariennes.

## Liste des références

- [2] **DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU (DRE)**. Étude pour la réalisation de système d'irrigation des périmètres – Périmètre : TAROUMA. Khenchela. DRE, 2024.
- [4] **BRITISH GEOLOGICAL SURVEY**. Hydrogéologie de l'Algérie – Région de Khenchela [en ligne]. Earthwise, 2020. Disponible sur : [https://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology\\_of\\_Algeria](https://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology_of_Algeria) (consulté le 21 février 2025).
- [5] **ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques)**. Données pluviométriques de la station de Zeribet El Oued. Alger. ANRH, 2024.
- [6] **ONM (Office National de la Météorologie)**. Données climatiques de la station de Biskra. Alger, ONM, 2024.
- [7] **SEDRATI, Abdenour**. Contribution à l'étude hydrogéochimique et isotopique des eaux de la nappe du complexe terminal – zone sud Khenchela – Algérie. Thèse de doctorat, Université de ABBES LAGHROUR Khenchela. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Option : Eau, Environnement et Energies Renouvelables. 2018. 342p.
- [8] **AHBOUH, Leila et AZIEZ, Ouahiba**. Cours et exercices corrigés : Drainage et Assainissement Agricole. [Polycope]. Année universitaire 2021–2022. 122p
- [9] **TOUAIBIA, B.** Manuel pratique d'hydrologie. Alger .2004. 166 p
- [10] **FAO**. Irrigation et drainage – Papier 56 : L'évapotranspiration des cultures – Lignes directrices pour le calcul des besoins en eau des cultures\*. Rome : FAO, 1998. 300 p

- [11] **HETTAK, Nesrine.** Étude d'aménagement hydro-agricole du périmètre Achachir à partir barrage Karmis, wilaya de Mostaganem. [MFE] Option : Irrigation et Drainage. Blida : École Nationale Supérieure d'Hydraulique (ENSH), 2020. 100 p.
- [12] **IFAS–University of Florida & FAO.** Irrigation Pump Types: radial-flow, axial-flow and mixed-flow pumps in agricultural systems. CIR832/WI001, 2016–2024. [en ligne]. Disponible sur : <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/WI001> (consulté le 20 mars 2025).
- [13] **FAO.** Manuel de conception des réseaux d'irrigation sous pression. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 1997. 184 p. (Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n° 45). ISBN 92-5-203924-7.
- [14] **FAO.** Technical handbook on pressurized irrigation techniques. Irrigation and Drainage Paper 45, Rome: FAO, 2019. 220 p. (révisé édition française). ISBN 92-5-109143-4.
- [15] **FAO.** Irrigation Manual\* [en ligne]. Rome : FAO, 2008-2012. Disponible sur : <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8de388c3-69f3-4c6e-b46d-240a5486e93f/content> (consulté le 11 mai 2025).

# **Annexes**

Annexe N°1 : Coefficients culturaux (Kc).

| CULTURE            | Stades de développement de la culture |               |           |               |           | Durée totale de la période végétative |
|--------------------|---------------------------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------------------------------|
|                    | Initial                               | Développement | Mi-saison | Fin de saison | Récolte   |                                       |
| Banancier tropical | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.85     | 1.0 -1.1  | 0.9 -1.0      | 0.75-0.85 | 0.7 -0.8                              |
| subtropical        | 0.5 -0.65                             | 0.8 -0.9      | 1.0 -1.2  | 1.0 -1.15     | 1.0 -1.15 | 0.85-0.95                             |
| Haricot vert       | 0.3 -0.4                              | 0.65-0.75     | 0.95-1.05 | 0.9 -0.95     | 0.85-0.95 | 0.85-0.9                              |
| sec                | 0.3 -0.4                              | 0.7 -0.8      | 1.05-1.2  | 0.65-0.75     | 0.25-0.3  | 0.7 -0.8                              |
| Chou               | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.8      | 0.95-1.1  | 0.9 -1.0      | 0.8 -0.95 | 0.7 -0.8                              |
| Coton              | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.8      | 1.05-1.25 | 0.8 -0.9      | 0.65-0.7  | 0.8 -0.9                              |
| Raisin             | 0.35-0.55                             | 0.6 -0.8      | 0.7 -0.9  | 0.6 -0.8      | 0.55-0.7  | 0.55-0.75                             |
| Arachide           | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.8      | 0.95-1.1  | 0.75-0.85     | 0.55-0.6  | 0.75-0.8                              |
| Maïs sucré         | 0.3 -0.5                              | 0.7 -0.9      | 1.05-1.2  | 1.0 -1.15     | 0.95-1.1  | 0.8 -0.95                             |
| grain              | 0.3 -0.5*                             | 0.7 -0.85*    | 1.05-1.2* | 0.8 -0.95     | 0.55-0.6* | 0.75-0.9*                             |
| Oignon sec         | 0.4 -0.6                              | 0.7 -0.8      | 0.95-1.1  | 0.85-0.9      | 0.75-0.85 | 0.8 -0.9                              |
| vert               | 0.4 -0.6                              | 0.6 -0.75     | 0.95-1.05 | 0.95-1.05     | 0.95-1.05 | 0.65-0.8                              |
| Pois, frais        | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.85     | 1.05-1.2  | 1.0 -1.15     | 0.95-1.1  | 0.8 -0.95                             |
| Poivron, frais     | 0.3 -0.4                              | 0.6 -0.75     | 0.95-1.1  | 0.85-1.0      | 0.8 -0.9  | 0.7 -0.8                              |
| Pomme de terre     | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.8      | 1.05-1.2  | 0.85-0.95     | 0.7 -0.75 | 0.75-0.9                              |
| Riz                | 1.1 -1.15                             | 1.1 -1.5      | 1.1 -1.3  | 0.95-1.05     | 0.95-1.05 | 1.05-1.2                              |
| Carthame           | 0.3 -0.4                              | 0.7 -0.8      | 1.05-1.2  | 0.65-0.7      | 0.2 -0.25 | 0.65-0.7                              |
| Sorgho             | 0.3 -0.4                              | 0.7 -0.75     | 1.0 -1.15 | 0.75-0.8      | 0.5 -0.55 | 0.75-0.85                             |
| Soja               | 0.3 -0.4                              | 0.7 -0.8      | 1.0 -1.15 | 0.7 -0.8      | 0.4 -0.5  | 0.75-0.9                              |
| Betterave sucrière | 0.4 -0.5                              | 0.75-0.85     | 1.05-1.2  | 0.9 -1.0      | 0.6 -0.7  | 0.8 -0.9                              |
| Canne à sucre      | 0.4 -0.5                              | 0.7 -1.0      | 1.0 -1.3  | 0.75-0.8      | 0.5 -0.6  | 0.85-1.05                             |
| Tournesol          | 0.3 -0.4                              | 0.7 -0.8      | 1.05-1.2  | 0.7 -0.8      | 0.35-0.45 | 0.75-0.85                             |
| Tabac              | 0.3 -0.4                              | 0.7 -0.8      | 1.0 -1.2  | 0.9 -1.0      | 0.75-0.85 | 0.85-0.95                             |
| Tomate             | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.8      | 1.05-1.25 | 0.8 -0.95     | 0.6 -0.65 | 0.75-0.9                              |
| Pastèque           | 0.4 -0.5                              | 0.7 -0.8      | 0.95-1.05 | 0.8 -0.9      | 0.65-0.75 | 0.75-0.85                             |
| Blé                | 0.3 -0.4                              | 0.7 -0.8      | 1.05-1.2  | 0.65-0.75     | 0.2 -0.25 | 0.8 -0.9                              |
| Luzerne            | 0.3 -0.4                              |               |           |               | 1.05-1.2  | 0.85-1.05                             |
| Agrumes sarclés    |                                       |               |           |               |           | 0.65-0.75                             |
| sans sarclage      |                                       |               |           |               |           | 0.85-0.9                              |
| Olivier            |                                       |               |           |               |           | 0.4 -0.6                              |

Premier chiffre: avec forte humidité (HR min > 70%) et vent faible (U < 5 m/s).

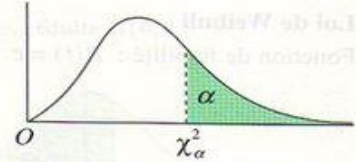
Second chiffre: avec faible humidité (HR min < 20%) et vent fort (> 5 m/s).

## Annexe N°2 : Tableau de calcul de Khi carré théorique

Table de distribution de  $\chi^2$  (loi de K. Pearson)

La table donne la probabilité  $\alpha$ , en fonction du nombre de degrés de liberté  $\nu$ , pour que  $\chi^2$  égale ou dépasse une valeur donnée  $\chi^2_\alpha$

$$\alpha = P(\chi^2 \geq \chi^2_\alpha)$$



| $\nu$ | $\alpha = 0,990$ | $\alpha = 0,975$ | $\alpha = 0,950$ | $\alpha = 0,900$ | $\alpha = 0,100$ | $\alpha = 0,050$ | $\alpha = 0,025$ | $\alpha = 0,010$ | $\alpha = 0,001$ |
|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1     | 0,0002           | 0,0010           | 0,0039           | 0,0158           | 2,71             | 3,84             | 5,02             | 6,63             | 10,83            |
| 2     | 0,02             | 0,05             | 0,10             | 0,21             | 4,61             | 5,99             | 7,38             | 9,21             | 13,82            |
| 3     | 0,12             | 0,22             | 0,35             | 0,58             | 6,25             | 7,81             | 9,35             | 11,34            | 16,27            |
| 4     | 0,30             | 0,48             | 0,71             | 1,06             | 7,78             | 9,49             | 11,14            | 13,28            | 18,47            |
| 5     | 0,55             | 0,83             | 1,15             | 1,61             | 9,24             | 11,07            | 12,83            | 15,09            | 20,52            |
| 6     | 0,87             | 1,24             | 1,64             | 2,20             | 10,64            | 12,59            | 14,45            | 16,81            | 22,46            |
| 7     | 1,24             | 1,69             | 2,17             | 2,83             | 12,02            | 14,07            | 16,01            | 18,47            | 24,32            |
| 8     | 1,65             | 2,18             | 2,73             | 3,49             | 13,36            | 15,51            | 17,53            | 20,09            | 26,13            |
| 9     | 2,09             | 2,70             | 3,33             | 4,17             | 14,68            | 16,92            | 19,02            | 21,67            | 27,88            |
| 10    | 2,56             | 3,25             | 3,94             | 4,87             | 15,99            | 18,31            | 20,48            | 23,21            | 29,59            |
| 11    | 3,05             | 3,82             | 4,57             | 5,58             | 17,27            | 19,67            | 21,92            | 24,72            | 31,26            |
| 12    | 3,57             | 4,40             | 5,23             | 6,30             | 18,55            | 21,03            | 23,34            | 26,22            | 32,91            |
| 13    | 4,11             | 5,01             | 5,89             | 7,04             | 19,81            | 22,36            | 24,74            | 27,69            | 34,53            |
| 14    | 4,66             | 5,63             | 6,57             | 7,79             | 21,06            | 23,68            | 26,12            | 29,14            | 36,12            |
| 15    | 5,23             | 6,26             | 7,26             | 8,55             | 22,31            | 25,00            | 27,49            | 30,58            | 37,70            |
| 16    | 5,81             | 6,91             | 7,96             | 9,31             | 23,54            | 26,30            | 28,84            | 32,00            | 39,25            |
| 17    | 6,41             | 7,56             | 8,67             | 10,08            | 24,77            | 27,59            | 30,19            | 33,41            | 40,79            |
| 18    | 7,01             | 8,23             | 9,39             | 10,86            | 25,99            | 28,87            | 31,53            | 34,80            | 42,31            |
| 19    | 7,63             | 8,91             | 10,12            | 11,65            | 27,20            | 30,14            | 32,85            | 36,19            | 43,82            |
| 20    | 8,26             | 9,59             | 10,85            | 12,44            | 28,41            | 31,41            | 34,17            | 37,57            | 45,32            |
| 21    | 8,90             | 10,28            | 11,59            | 13,24            | 29,61            | 32,67            | 35,48            | 38,93            | 46,80            |
| 22    | 9,54             | 10,98            | 12,34            | 14,04            | 30,81            | 33,92            | 36,78            | 40,29            | 48,27            |
| 23    | 10,20            | 11,69            | 13,09            | 14,85            | 32,01            | 35,17            | 38,08            | 41,64            | 49,73            |
| 24    | 10,86            | 12,40            | 13,85            | 15,66            | 33,20            | 36,41            | 39,37            | 42,98            | 51,18            |
| 25    | 11,52            | 13,12            | 14,61            | 16,47            | 34,38            | 37,65            | 40,65            | 44,31            | 52,62            |
| 26    | 12,20            | 13,84            | 15,38            | 17,29            | 35,56            | 38,88            | 41,92            | 45,64            | 54,05            |
| 27    | 12,88            | 14,57            | 16,15            | 18,11            | 36,74            | 40,11            | 43,19            | 46,96            | 55,48            |
| 28    | 13,57            | 15,31            | 16,93            | 18,94            | 37,92            | 41,34            | 44,46            | 48,28            | 56,89            |
| 29    | 14,26            | 16,05            | 17,71            | 19,77            | 39,09            | 42,56            | 45,72            | 49,59            | 58,30            |
| 30    | 14,95            | 16,79            | 18,49            | 20,60            | 40,26            | 43,77            | 46,98            | 50,89            | 59,70            |

Quand  $\nu$  est supérieur à 30, on utilise la table de la loi normale (table de l'écart réduit) avec :

$$r = \sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2\nu - 1}$$

**Annexe N°3 : Tolérance des cultures par rapport à la salinité total en relation avec les chutes de rendement.**

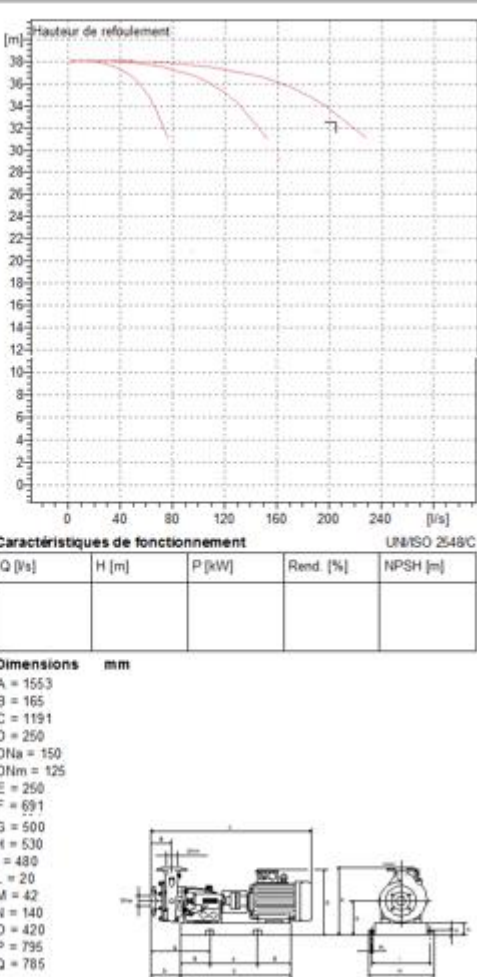
| Culture         | 0 %              |                  |    | 10 %             |                  |    | 25 %             |                  |    | 50 %             |                  |    | CE <sub>dw</sub> max |
|-----------------|------------------|------------------|----|------------------|------------------|----|------------------|------------------|----|------------------|------------------|----|----------------------|
|                 | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR |                      |
| orge            | 8                | 5.3              | 10 | 10               | 6.7              | 12 | 13               | 8.7              | 15 | 18               | 12               | 21 | 56                   |
| COTON           | 7.7              | 5.1              | 10 | 9.6              | 6.4              | 12 | 13               | 8.3              | 15 | 17               | 12               | 21 | 54                   |
| BETT SUCR       | 7                | 4.7              | 10 | 8.7              | 5.8              | 12 | 11               | 7.5              | 16 | 15               | 10               | 21 | 48                   |
| BLE             | 6                | 4                | 10 | 7.4              | 4.9              | 12 | 9.5              | 6.4              | 16 | 13               | 8.7              | 22 | 40                   |
| CARTHAME        | 5.3              | 3.5              | 12 | 6.2              | 4.1              | 14 | 7.6              | 5                | 17 | 9.9              | 6.6              | 23 | 29                   |
| SOJA            | 5                | 3.2              | 17 | 5.5              | 3.7              | 18 | 6.2              | 4.2              | 21 | 7.5              | 5                | 25 | 20                   |
| SORGHO          | 4                | 2.7              | 7  | 5.1              | 3.4              | 9  | 7.2              | 4.8              | 13 | 11               | 7.2              | 20 | 36                   |
| ARACHIDE        | 3.2              | 2.1              | 16 | 3.5              | 2.4              | 18 | 4.1              | 2.7              | 21 | 4.9              | 3.3              | 25 | 13                   |
| RIZ             | 3                | 2                | 9  | 3.8              | 2.6              | 11 | 5.1              | 3.4              | 15 | 7.2              | 4.8              | 21 | 23                   |
| SESBANIA        | 2.3              | 1.5              | 6  | 3.7              | 2.5              | 8  | 5.9              | 3.9              | 12 | 9.4              | 6.3              | 19 | 35                   |
| MACROCARPA      |                  |                  |    |                  |                  |    |                  |                  |    |                  |                  |    |                      |
| MAIS            | 1.7              | 1.1              | 6  | 2.5              | 1.7              | 8  | 3.8              | 2.5              | 13 | 5.8              | 3.9              | 20 | 20                   |
| LIN             | 1.7              |                  |    | IDEM             |                  |    | 4.2              | 2                | 12 | 6.8              | 4.5              | 19 | 24                   |
| FEVE            | 1.6              | 1.1              | 4  | 2.6              | 1.8              | 7  | 3.1              | 2.1              | 12 | 4.9              | 3.2              | 19 | 17                   |
| POIS            | 1.3              | .9               | 5  | 2                | 1.3              | 8  | 2.3              | 1.5              | 12 | 3.6              | 2.4              | 19 | 12                   |
| HARICOT         | 1                | .7               | 5  | 1.5              | 1                | 8  | 2.3              | 1.5              | 12 | 3.6              | 2.4              | 19 | 64                   |
| PALMIER DAT     | 4                | 2.7              | 4  | 6.8              | 4.5              | 7  | 10.9             | 7.3              | 11 | 17.9             | 12               | 19 | 28                   |
| FIGUIER         | 2.7              | 1.8              | 6  | 3.8              | 2.6              | 9  | 5.5              | 3.7              | 13 | 8.4              | 5.6              | 20 |                      |
| OLIVIER         |                  |                  |    | IDEM             |                  |    |                  |                  |    |                  |                  |    |                      |
| PAMPLEMOUSSE    | 1.8              | 1.2              | 8  | 2.4              | 1.6              | 10 | 3.4              | 2.2              | 14 | 4.9              | 3.3              | 21 | 16                   |
| ORANGE & CITRON | 1.7              | 1.1              | 7  | 2.3              | 1.6              | 10 | 3.3              | 2.2              | 14 | 4.8              | 3.2              | 20 | 16                   |
| POMMIER         | 1.7              | 1                | 6  | 2.3              | 1.6              | 10 | 3.3              | 2.2              | 14 | 4.8              | 3.2              | 20 | 16                   |
| NOYER           |                  |                  |    | IDEM             |                  |    |                  |                  |    |                  |                  |    |                      |
| PECHER          | 1.7              | 1.1              | 9  | 2.2              | 1.4              | 11 | 2.9              | 1.9              | 15 | 4.1              | 2.7              | 21 | 13                   |
| ABRICOTIER      | 1.6              | 1.1              | 9  | 2                | 1.3              | 11 | 2.6              | 1.8              | 15 | 3.7              | 2.5              | 20 | 12                   |

| Culture         | 0 %              |                  |    | 10 %             |                  |    | 25 %             |                  |    | 50 %             |                  |    | CE <sub>dw</sub> max |
|-----------------|------------------|------------------|----|------------------|------------------|----|------------------|------------------|----|------------------|------------------|----|----------------------|
|                 | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR | CE <sub>es</sub> | CE <sub>iw</sub> | LR |                      |
| VIGNE           | 1.5              | 1                | 4  | 2.5              | 1.7              | 7  | 4.1              | 2.7              | 11 | 6.7              | 4.5              | 19 | 24                   |
| AMANDIER        | 1.5              | 1                | 7  | 2                | 1.4              | 10 | 2.8              | 1.9              | 13 | 4.1              | 2.7              | 20 | 14                   |
| PRUNIER         | 1.5              | 1                | 7  | 2.1              | 1.4              | 10 | 2.9              | 1.9              | 14 | 4.3              | 2.8              | 20 | 14                   |
| MURIER          | 1.5              | 1                | 8  | 2                | 1.3              | 11 | 2.6              | 1.8              | 15 | 3.8              | 2.5              | 21 | 12                   |
| AVOCAT          | 1.3              | .9               | 7  | 1.8              | 1.2              | 10 | 2.5              | 1.7              | 15 | 3.7              | 2.4              | 20 | 12                   |
| FRAMBOISIER     | 1                | .7               | 6  | 1.4              | 1                | 9  | 2.1              | 1.4              | 13 | 3.2              | 2.1              | 19 | 11                   |
| FRAISIER        | 1                | .7               | 8  | 1.3              | .9               | 10 | 1.8              | 1.2              | 15 | 2.5              | 1.7              | 21 | 8                    |
| BETTERAVE       | 4                | 2.7              | 9  | 5.1              | 3.4              | 11 | 6.8              | 4.5              | 15 | 9.6              | 6.4              | 21 | 30                   |
| BROCCOLI        | 2.8              | 1.9              | 7  | 3.9              | 2.6              | 10 | 5.5              | 3.7              | 14 | 8.2              | 5.5              | 20 | 27                   |
| TOMATE          | 2.5              | 1.7              | 7  | 3.5              | 2.3              | 9  | 5                | 3.4              | 13 | 7.6              | 5                | 20 | 25                   |
| CONCOMBRE       | 2.5              | 1.7              | 8  | 3.3              | 2.2              | 11 | 4.4              | 2.9              | 15 | 6.3              | 4.2              | 21 | 20                   |
| CANTALOUPE      | 2.2              | 1.5              | 5  | 3.6              | 2.4              | 7  | 5.7              | 3.8              | 12 | 9.1              | 6.1              | 19 | 32                   |
| EPINARDS        | 2                | 1.3              | 4  | 3.3              | 2.2              | 7  | 5.3              | 3.5              | 12 | 8.6              | 5.7              | 19 | 30                   |
| CHOU            | 1.8              | 1.2              | 5  | 2.8              | 1.9              | 8  | 4.4              | 2.9              | 12 | 7                | 4.6              | 19 | 24                   |
| POMME DE TERRE  | 1.7              | 1.1              | 6  | 2.5              | 1.7              | 8  | 3.8              | 2.5              | 13 | 5.9              | 3.9              | 20 | 20                   |
| MAIS DOUX       |                  |                  |    | IDEM             |                  |    |                  |                  |    |                  |                  |    |                      |
| PATATE DOUCE    | 1.5              | 1                | 5  | 2.4              | 1.6              | 8  | 3.8              | 2.5              | 12 | 6                | 4                | 19 | 21                   |
| PCIVRE          | 1.5              | 1                | 6  | 2.2              | 1.5              | 9  | 3.3              | 2.2              | 13 | 5.1              | 3.4              | 20 | 17                   |
| LAITUE          | 1.3              | .9               | 5  | 2.1              | 1.4              | 8  | 3.2              | 2.1              | 12 | 5.2              | 3.4              | 19 | 18                   |
| RADIS           | 1.2              | .8               | 4  | 2                | 1.3              | 7  | 3.1              | 2.1              | 12 | 5                | 3.4              | 19 | 18                   |
| OIGNON          | 1.2              | .8               | 5  | 1.8              | 1.2              | 8  | 2.8              | 1.8              | 12 | 4.3              | 2.9              | 19 | 15                   |
| CAROTTE         | 1                | .7               | 4  | 1.7              | 1.1              | 7  | 2.8              | 1.9              | 12 | 4.6              | 3.1              | 19 | 16                   |
| HARICOT         | 1                | .7               | 6  | 1.5              | 1                | 8  | 2.3              | 1.5              | 12 | 3.6              | 2.4              | 19 | 12.5                 |
| AGROPHYRON      | 7.5              | 5                | 8  | 9.9              | 6.6              | 10 | 13.3             | 9                | 14 | 19.4             | 13               | 21 | 63                   |
| ELONGATUM       |                  |                  |    |                  |                  |    |                  |                  |    |                  |                  |    |                      |
| ID. VARIETE     | 7.5              | 5                | 11 | 9                | 6                | 14 | 11               | 7.4              | 17 | 15               | 9.8              | 22 | 44                   |
| CYNODON DACT.   | 6.9              | 4.6              | 10 | 8.5              | 5.7              | 13 | 10.8             | 7.2              | 16 | 14.7             | 9.8              | 22 | 45                   |
| ORGE FOURR.     | 6                | 4                | 10 | 7.4              | 4.9              | 11 | 9.5              | 6.3              | 16 | 13               | 8.7              | 22 | 40                   |
| LOLIUM          | 5.6              | 3.7              | 10 | 6.9              | 4.6              | 12 | 8.9              | 5.9              | 16 | 12.2             | 8.1              | 21 | 38                   |
| PHALARIS TUBER. | 4.6              | 3.1              | 9  | 5.9              | 3.9              | 11 | 7.9              | 5.3              | 15 | 11.1             | 7.4              | 21 | 36                   |
| FESTULIA ELATOR | 3.9              | 2.6              | 6  | 5.8              | 3.8              | 8  | 8.6              | 5.7              | 12 | 13.3             | 8.9              | 19 | 46                   |
| AGROPHYRON DES. | 3.5              | 2.3              | 4  | 6                | 4                | 7  | 9.8              | 6.5              | 11 | 16               | 11               | 19 | 57                   |
| VICIA SATIVA    | 3                | 2                | 8  | 3.9              | 2.6              | 11 | 5.3              | 3.5              | 15 | 7.6              | 5                | 21 | 24                   |

Annexe N°4 : Fiche technique de la pompe.



| MEC-AZ 3/125A                       |                                |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>Caractéristiques requises</b>    |                                |
| Débit                               | 205 l/s                        |
| Hauteur de refoulement              | 32.5 m                         |
| Fluide                              | Eau potable                    |
| Température                         | 290 K                          |
| Type d'installation                 | Pompes identiques en parallèle |
| Nb de pompes                        | 4                              |
| <b>Caractéristiques de la pompe</b> |                                |
| Débit                               | 69.1 l/s                       |
| Hauteur de refoulement              | 33.2 m                         |
| Puissance absorbée                  | 28.5 kW                        |
| Rendement                           | 80.6%                          |
| Hauteur manométrique H(Q=0)         | 36 m                           |
| Orif. de refoulement                | 125 mm                         |
| <b>Caractéristiques moteur</b>      |                                |
| Fréquence                           | 50 Hz                          |
| Tension nominale                    | 400 V                          |
| Vitesse nominale                    | 1450 1/min                     |
| Nombre de pôles                     | 4                              |
| Puissance nominale P2               | 30 kW                          |
| Courant nominal                     | - A                            |
| Type de moteur                      | 3~                             |
| Classe d'isolation                  | F                              |
| Degré de protection                 | IP 55                          |
| <b>Limites opérationnelles</b>      |                                |
| Démarrages / h max.                 | 5                              |
| Température maxi. du liquide pompé  | 363 K                          |
| Teneur maximum en matières solides  | 40 g/m³                        |
| Densité max.                        | 998 kg/m³                      |
| Viscosité max.                      | 1 mm²/s                        |
| <b>Caractéristiques générales</b>   |                                |
| Poids                               | 511 kg                         |
| <b>Matériaux</b>                    |                                |
| Corps de pompe                      | Fonte                          |
| Corps d'aspiration                  | Fonte                          |
| Chaise -palier                      | Fonte                          |
| Roue                                | Fonte                          |
| Roue (04/80)                        | Fonte sphéroïdale              |
| Arbre ( Z )                         | Acier inox                     |
| Douille arbre                       | Acier cromé                    |
| Roulements à billes                 | Acier                          |
| Presse-Etoupe                       | Fonte                          |
| Etoupe                              | Tresse graphitée               |



## Annexe N°6 : La nouvelle fiche technique des asperseurs de type Pierrot.

| Diamètres des buses | P (bar)<br>2,5 | P (bar)<br>3,0 | P (bar)<br>3,5 | P (bar)<br>4,0 | P (bar)<br>4,5 | P (bar) 2,5<br> | P (bar) 3,0<br> | P (bar) 3,5<br> | P (bar) 4,0<br> | P (bar) 4,5<br> | P (bar) 5,0<br> | P (bar) 6,0<br> | P (bar) 7,0<br> | P (bar) 8,0<br> | P (bar) 9,0<br> | P (bar) 10,0<br> | P (bar) 12,0<br> | P (bar) 15,0<br> | P (bar) 20,0<br> | P (bar) 25,0<br> | P (bar) 30,0<br> | P (bar) 40,0<br> | P (bar) 50,0<br> | P (bar) 60,0<br> | P (bar) 80,0<br> | P (bar) 100,0<br> | P (bar) 120,0<br> | P (bar) 150,0<br> | P (bar) 200,0<br> | P (bar) 250,0<br> | P (bar) 300,0<br> | P (bar) 400,0<br> | P (bar) 500,0<br> | P (bar) 600,0<br> | P (bar) 800,0<br> | P (bar) 1000,0<br> | P (bar) 1200,0<br> | P (bar) 1500,0<br> | P (bar) 2000,0<br> | P (bar) 2500,0<br> | P (bar) 3000,0<br> | P (bar) 4000,0<br> | P (bar) 5000,0<br> | P (bar) 6000,0<br> | P (bar) 8000,0<br> | P (bar) 10000,0<br> | P (bar) 12000,0<br> | P (bar) 15000,0<br> | P (bar) 20000,0<br> | P (bar) 25000,0<br> | P (bar) 30000,0<br> | P (bar) 40000,0<br> | P (bar) 50000,0<br> | P (bar) 60000,0<br> | P (bar) 80000,0<br> | P (bar) 100000,0<br> | P (bar) 120000,0<br> | P (bar) 150000,0<br> | P (bar) 200000,0<br> | P (bar) 250000,0<br> | P (bar) 300000,0<br> | P (bar) 400000,0<br> | P (bar) 500000,0<br> | P (bar) 600000,0<br> | P (bar) 800000,0<br> | P (bar) 1000000,0<br> | P (bar) 1200000,0<br> | P (bar) 1500000,0<br> | P (bar) 2000000,0<br> | P (bar) 2500000,0<br> | P (bar) 3000000,0<br> | P (bar) 4000000,0<br> | P (bar) 5000000,0<br> | P (bar) 6000000,0<br> | P (bar) 8000000,0<br> | P (bar) 10000000,0<br> | P (bar) 12000000,0<br> | P (bar) 15000000,0<br> | P (bar) 20000000,0<br> | P (bar) 25000000,0<br> | P (bar) 30000000,0<br> | P (bar) 40000000,0<br> | P (bar) 50000000,0<br> | P (bar) 60000000,0<br> | P (bar) 80000000,0<br> | P (bar) 100000000,0<br> | P (bar) 120000000,0<br> | P (bar) 150000000,0<br> | P (bar) 200000000,0<br> | P (bar) 250000000,0<br> | P (bar) 300000000,0<br> | P (bar) 400000000,0<br> | P (bar) 500000000,0<br> | P (bar) 600000000,0<br> | P (bar) 800000000,0<br> | P (bar) 1000000000,0<br> | P (bar) 1200000000,0<br> | P (bar) 1500000000,0<br> | P (bar) 2000000000,0<br> | P (bar) 2500000000,0<br> | P (bar) 3000000000,0<br> | P (bar) 4000000000,0<br> | P (bar) 5000000000,0<br> | P (bar) 6000000000,0<br> | P (bar) 8000000000,0<br> | P (bar) 10000000000,0<br> | P (bar) 12000000000,0<br> | P (bar) 15000000000,0<br> | P (bar) 20000000000,0<br> | P (bar) 25000000000,0<br> | P (bar) 30000000000,0<br> | P (bar) 40000000000,0<br> | P (bar) 50000000000,0<br> | P (bar) 60000000000,0<br> | P (bar) 80000000000,0<br> | P (bar) 100000000000,0<br> | P (bar) 120000000000,0<br> | P (bar) 150000000000,0<br> | P (bar) 200000000000,0<br> | P (bar) 250000000000,0<br> | P (bar) 300000000000,0<br> | P (bar) 400000000000,0<br> | P (bar) 500000000000,0<br> | P (bar) 600000000000,0<br> | P (bar) 800000000000,0<br> | P (bar) 1000000000000,0<br> | P (bar) 1200000000000,0<br> | P (bar) 1500000000000,0<br> | P (bar) 2000000000000,0<br> | P (bar) 2500000000000,0<br> | P (bar) 3000000000000,0<br> | P (bar) 4000000000000,0<br> | P (bar) 5000000000000,0<br> | P (bar) 6000000000000,0<br> | P (bar) 8000000000000,0<br> | P (bar) 10000000000000,0<br> | P (bar) 12000000000000,0<br> | P (bar) 15000000000000,0<br> | P (bar) 20000000000000,0<br> | P (bar) 25000000000000,0<br> | P (bar) 30000000000000,0<br> | P (bar) 40000000000000,0<br> | P (bar) 50000000000000,0<br> | P (bar) 60000000000000,0<br> | P (bar) 80000000000000,0<br> | P (bar) 100000000000000,0<br> | P (bar) 120000000000000,0<br> | P (bar) 150000000000000,0<br> | P (bar) 200000000000000,0<br> | P (bar) 250000000000000,0<br> | P (bar) 300000000000000,0<br> | P (bar) 400000000000000,0<br> | P (bar) 500000000000000,0<br> | P (bar) 600000000000000,0<br> | P (bar) 800000000000000,0<br> | P (bar) 1000000000000000,0<br> | P (bar) 1200000000000000,0<br> | P (bar) 1500000000000000,0<br> | P (bar) 2000000000000000,0<br> | P (bar) 2500000000000000,0<br> | P (bar) 3000000000000000,0<br> | P (bar) 4000000000000000,0<br> | P (bar) 5000000000000000,0<br> | P (bar) 6000000000000000,0<br> | P (bar) 8000000000000000,0<br> | P (bar) 10000000000000000,0<br> | P (bar) 12000000000000000,0<br> | P (bar) 15000000000000000,0<br> | P (bar) 20000000000000000,0<br> | P (bar) 25000000000000000,0<br> | P (bar) 30000000000000000,0<br> | P (bar) 40000000000000000,0<br> | P (bar) 50000000000000000,0<br> | P (bar) 60000000000000000,0<br> | P (bar) 80000000000000000,0<br> | P (bar) 100000000000000000,0<br> | P (bar) 120000000000000000,0<br> | P (bar) 150000000000000000,0<br> | P (bar) 200000000000000000,0<br> | P (bar) 250000000000000000,0<br> | P (bar) 300000000000000000,0<br> | P (bar) 400000000000000000,0<br> | P (bar) 500000000000000000,0<br> | P (bar) 600000000000000000,0<br> | P (bar) 800000000000000000,0<br> | P (bar) 1000000000000000000,0<br> | P (bar) 1200000000000000000,0<br> | P (bar) 1500000000000000000,0<br> | P (bar) 2000000000000000000,0<br> | P (bar) 2500000000000000000, |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|