

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

NATIONAL HIGHER SCHOOL FOR
HYDRAULICS

"The MujahidAbdellah ARBAOUI"



المدرسة الوطنية العليا للري

"المجاهد عبد الله عرابوي"

ⵓⵎⵓⵎⵉⵏⵜ ⵓⵎⵓⵎⵉⵏⵜ ⵓⵎⵓⵎⵉⵏⵜ ⵓⵎⵓⵎⵉⵏⵜ ⵓⵎⵓⵎⵉⵏⵜ

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : IRRIGATION ET DRAINAGE

THEME :

**Étude d'aménagement hydro-agricole du périmètre d'El mehmel,
(400ha) à partir d'un forage , wilaya de Khenchela.**

Présenté par :

Kissali mohammed ali

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
Mr.KAHLERRAS Djilali	M.C.A	Président
Mr. BENKACI Ali Tarik	M.C.A	Examineur
Mr.BOUZIANE omar	M.A.A	Examineur
Mr. Rassoul Abdelaziz	PROFESSEUR	Promoteur

Session: Septembre 2025

Sommaire

Chapitre I : Analyse des conditions naturelles

I Introduction	1
I.2 Présentation générale de la wilaya de khenchela	1
I.2.1 Situation géographique de la wilaya de Khenchela	1
I.2.2 Présentation du périmètre d'étude	2
I.3 Etude géologique :	2
I.3.1 Les formations géologiques :	2
I.3.2 Géomorphologie/Relief.....	3
I.4 Etude climatologique :	3
I.4.1 Choix de la station météorologique	3
I.4.2 La température :	4
I.4.3 La pluviométrie:	5
I.4.4 Le vent:	5
I.4.5 L'humidité relative :	6
I.4.6 L'insolation :	7
I.5 Calcul des indices Agro-météorologiques :	7
I.5.1 Indice d'aridité de Martonne :	7
I.5.2 Quotient Ombrothermique d'Emberger :	8
I.5.3 Indice de Bagnouls et Gaussen :	10
I.6 Etude socio-économique.....	10
Conclusion:	11

Chapitre II : Ressources en sol- Ressources en eau

II.1 Introduction	12
II.2 Ressources en eau :	12
II.2.2 Caractéristiques des forages:	13

II.3 Classification des eaux de l'irrigation :	13
II.3.1 Risque lié à la salinité :	14
II.3.2 Risque d'alcalinisation :	15
II.4 Ressources en sol :	17
II.4.3. résultats des analyses de sol:	18
II.5 Calcul de la pluie de projet:	20
II.5.1 Choix de la station pluviométrique :	20
II.5.2 Analyse de l'homogénéité des données pluviométriques :	22
II.5.3 Ajustement des pluies annuelles	23
II.5 Conclusion.	25

Chapitre III: Besoins en eau du Périmètre

III.1 Introduction.	32
III.2 Besoins en eau du périmètre :	32
III.2.1 Estimation des besoins en eau pour l'irrigation :	32
III.2.2 L'évapotranspiration de référence (ET ₀) :	32
III.2.3 Calcul de la pluie efficace :	34
III.2.4 Calcul de la réserve en eau du sol (RS _i) :	35
III.3.1 Occupation des sols:	35
III.3.2 Assolements des cultures :	36
III.4. Estimation des coefficients culturaux (K _c) :	37
III.5. Estimation des besoins en eau des cultures choisies :	37
III.5.1 Estimation des besoins en eau des céréales :	38
III.5.2. Estimation des besoins en eau des maraîchages :	40
III.5.3. Estimation des besoins en eau des arboricultures :	43
III.5.4. Estimation des besoins en eau des Fourragères :	44
III.6. Calcul des besoins en eau pour les assolements 1 et 2 :	45
III.6.1 Calcul du débit spécifique	46

III.6.2 Evaluation du débit caractéristique :	47
III.6.3. Estimation des volumes d'eau d'irrigation :.....	47
III.7. Conclusion :	47

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.....	51
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.....	54
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.....	55
IV.7.11 Choix de nombre et de type de pompe	56
IV.8 Dimensionnement du Réservoir de stockage	60
IV.9 Etude du système de distribution	61
IV.9.1 Choix du matériau des conduites :.....	61
IV.9.2 Calcul des diamètres :.....	62

IV.9.3 Calcul des pressions des nœuds et des bornes :	62
---	----

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) :.....	69
V.4 Irrigation par aspersion :.....	71
V.4.1 Installations mobiles :	71
V.4.2 Avantages et inconvénients de l'irrigation par aspersion :	73
V.5 Choix des techniques d'irrigation adaptées à la zone d'étude	73
V.6 Conclusion :	73

Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle

VI.1 Introduction	73
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 :.....	80
VI.4.1 Données générales :	80
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 :.....	85
VI.5 Conclusion.....	89

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	92
VII.3.1 Dimensions de la tranchée	92
VII.3.2 Evaluation du cout des travaux de terrassement	94
VII.4 Evaluation des prix de pose des conduites	95
VII.5 Estimation du coût des pièces spéciales.....	96
VII.6 Estimation des coûts du bassin d'aspiration et des pompes de refoulement	96
VII.7 Estimation du cout de forage.....	97
VII.8 Coût total de projet :	98
VII.9 Conclusion.....	98

Liste des figures :

Figure I.1 : Carte de situation géographique de la wilaya de kenchla.

Figure I.2 : localisation de périmètre El Mahmel (source : Earthstar Geographics SIO 2025)

Figure I.3 : Evolution des températures mensuelles de l'air (Station yabous)

Figure I.4 : variation de la vitesse mensuelle du vent

Figure I.5 : Variation mensuelle des taux d'humidité (maximums, moyens et minimums)

Figure I.6: Climagramme d'Emberge

Figure I.7 :Diagramme Ombrothermique de la zone d'étude

Figure II.1 : Diagramme de la classification des eaux d'irrigation de l'USSR (1954)

Figure II.2 : Analyse texturale des sols étudiés

Figure II.3 : Ajustement des Précipitations moyennes annuelles aux lois normale et Log-Normale

Figure IV.1. Bilan économique total en fonction des diamètres étudiés-reservoir1-

Figure IV.2. Bilan économique total en fonction des diamètres étudiés-reservoir2-

Figure IV.3 : Courbe caractéristique de la pompe-1-

Figure IV.4: Courbe caractéristique de la pompe -2-

Figure V.1: Irrigation à la raie

Figure V.2 : Irrigation par submersion

Figure V.3 : Irrigation localisée

Figure V.4 : Irrigation par enrouleur

Figure V.5 : Irrigation par rampe frontale

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Caractéristiques de la Station météorologique de yabous.

Tableau I.2 : Températures moyennes mensuelles

tableau I.3 : les pluies mensuelles en mm

Tableau I.4: Vitesses mensuelles du vent (2009-2021)

Tableau I.5: L'humidité relative moyenne mensuelle en % (2009-2021)

Tableau I.6 : Durée d'insolations moyennes mensuelles en heures (2009-2001)

Tableau I.7 : Classement de l'Indice d'aridité et type de Climat

Tableau II.1:Caractéristique chimique de l'eau d'irrigation du step

Tableau II.3:Caractéristique chimique de l'eau d'irrigation de forage

Tableau II.4 : Risque d'irrigation en fonction de la salinité.

Tableau II.5: Risque d'irrigation en fonction d'alcalinisation.

Tableau II.6 : Caractéristiques physico – chimiques :

Tableau II.7: Propriétés hydrodynamiques des sols

Tableau II .8 : Caractéristiques de la station pluviométrique

Tableau II.9 : Paramètres de la série pluviométrique

Tableau II.10 : Résultat du test Mood

Tableau II.11 : Test de validité des deux ajustements

Tableau II.12 : Résultat de l'ajustement

Tableau II.13 : Calcul des pluies mensuelles pour l'année sèche (freq= 80%)

Tableau III.1: Evapotranspiration de référence ET₀ calculée par logiciel CROPWAT.

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

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

Tableau III.4 : Système de cultures proposées

Tableau III.5 : Assolement proposé pour le périmètre el mehmel

Tableau III.7 : Calcul des besoins en eau pour le Blé

Tableau III.8 : Calcul des besoins en eau pour le blé d'hiver

Tableau III.9 : Calcul des besoins en eau pour l'orge en grain.

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

Tableau III.11 : Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre (AS)

Tableau III.12 : Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre (Saison)

Tableau III.13 : Calcul des besoins en eau pour la tomate

Tableau III.14 : Calcul des besoins en eau pour la courgette.

Tableau III.15 : Calcul des besoins en eau pour l'oignon.

Tableau III.16 : Calcul des besoins en eau pour l'Ail.

Tableau III.17 : Calcul des besoins en eau pour l'haricot.

Tableau III.18 : Calcul des besoins en eau pour la vigne.

Tableau III.19 : Calcul des besoins en eau pour l'olivier.

Tableau III.20: Calcul des besoins en eau pour Le Sorgho

Tableau III.21: Calcul des besoins en eau pour l'Avoine

Tableau III.22: Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 1

Tableau III.23: Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 2.

Tableau III.24 : volume d'eau d'irrigation.

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

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

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

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

Tableau IV.5: Estimation des frais d'exploitation selon le diamètre de la conduite - réservoir1-

Tableau IV.6: Bilan total des frais - réservoir1-

Tableau IV.7 : Résultats de Sélection nombre de Pompes – Logiciel Caprari-1-

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

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

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

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

Tableau VII.1: Calcul des différents volumes.

Tableau VII.2 : le coût estimatif des travaux de terrassement.

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

Tableau VII.4 : Estimation du coût des pièces spéciales

Tableau VII.5: Estimation du coût des pompes de refoulement.

Tableau VII.6: Estimation du coût du réservoir 1000m³

Tableau VII.7: Estimation du coût du réservoir 250m³

Tableau VII.8: Estimation du cout de forage.

Tableau VII.9 : Le coût total du projet

Liste des planches :

Planche 1:Plan situation du perimetre el mehmel

Planche 2 :plan aménagement hydro agricole du perimetre el mehmel khenchla

Planche 3 :reseau d'irrigation Goutte a Goutte

Planche 4 : Profil en long du reseau de distribution

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 Rassoul abdelaziz, 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 abdeli mohamed et Monsieur mordjane riadh, 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 : smaili anis, hakim, reayne, aymen, nadjib, yacine, l'ingénieur Ramí Himeur, Sakí Sid Ahmed, Sahraoui Mostafa, Soualhi Abdennacer, Zinou, 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.

Dédicaces:

Je dédie ce travail, avec tout le respect et l'amour que je porte dans mon cœur, à mes parents, mon père Ahmed et ma mère malika , qui m'ont toujours soutenu moralement. Leur patience, leurs sacrifice 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 mon frère zakí , 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 :

يتناول هذا البحث دراسة وتصميم شبكة سقي فعّالة في محيط المحمل بولاية خنشلة، على مساحة تُقدّر بـ 400 هكتار. وتعتمد المنطقة موضوع الدراسة أساسًا على استغلال الآبار كمصدر رئيسي للمياه، في ظل ندرة التساقطات ، الأمر الذي استوجب اقتراح نظام سقي عصري يضمن إدارة رشيدة للموارد المائية وتلبية دقيقة لاحتياجات المزروعات من المياه، حيث شملت الدراسة تحليل المعطيات المناخية وخصائص التربة والمعايير الزراعية، مما أتاح وضع برنامج زراعي ملائم لخصوصيات الموقع. وقد تم اعتماد تقنيات ري حديثة وفعّالة بهدف تحسين المردود، وترشيد استهلاك المياه، وتقليل التكاليف.

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

Résumé :

Ce mémoire est consacré à l'étude et à la conception d'un réseau d'irrigation performant dans le périmètre d'El Mehmel, situé dans la wilaya de Khenchela, sur une superficie de 400 hectares. La zone étudiée repose principalement sur l'exploitation de forages comme source d'approvisionnement en eau, dans un contexte marqué par de faibles précipitations . Cette situation a motivé la mise en place d'un système d'irrigation moderne, capable d'assurer une gestion rationnelle des ressources hydriques et de répondre de manière précise aux besoins des cultures.

L'étude a porté sur l'analyse des données climatiques, des propriétés du sol ainsi que des paramètres agricoles, ce qui a permis de définir un programme cultural adapté aux spécificités du site. Des techniques d'irrigation efficaces ont été retenues, dans l'objectif d'améliorer les rendements, d'optimiser l'utilisation de l'eau et de réduire les coûts d'exploitation

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

Abstract:

This dissertation focuses on the study and design of an efficient irrigation network in the El Mehmel perimeter, located in Khenchela province, covering an area of 400 hectares. The study area relies mainly on groundwater from boreholes as the primary source of water, in a context of low rainfall. This situation required the proposal of a modern irrigation system that

ensures rational water management and precisely meets the crops' water requirements. The study involved the analysis of climatic data, soil characteristics, and agricultural parameters, which made it possible to establish a cropping program adapted to the site. Efficient irrigation techniques were adopted with the aim of improving yields, optimizing water use, and reducing costs

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

Introduction générale

Face à la raréfaction croissante des ressources en eau et aux pressions exercées par l'expansion démographique et les changements climatiques, la question de la gestion durable de l'irrigation prend une importance capitale. Dans de nombreuses régions arides et semi-arides, l'agriculture, pilier du développement économique et social, demeure fortement tributaire de la disponibilité et de la bonne gestion de cette ressource vitale.

En Algérie, caractérisée par un climat semi-aride, les contraintes hydriques se traduisent par une répartition irrégulière des précipitations, une sur exploitation des nappes phréatiques et une pression accrue sur les périmètres agricoles. Ces conditions imposent le recours à des systèmes d'irrigation modernes et rationnels, capables de garantir une meilleure efficacité hydraulique et de préserver durablement les ressources existantes.

La région d'El Mehmel, située dans la wilaya de Khenchela, illustre parfaitement cette problématique. Malgré un potentiel agricole considérable, son développement reste limité par l'insuffisance d'aménagements hydro-agricoles adaptés. Le périmètre étudié offre pourtant des perspectives de valorisation, à condition d'y mettre en place une stratégie intégrée de mobilisation des ressources en eau et d'optimisation des techniques d'irrigation.

Dans ce contexte, le présent mémoire propose une étude technique d'aménagement hydro-agricole, articulée autour de la conception d'un réseau d'irrigation sous pression alimenté par les forages disponibles. Cette démarche vise non seulement à assurer une distribution équitable et efficace de l'eau, mais aussi à créer les conditions nécessaires pour une intensification et une modernisation durables des activités agricoles dans la région

Chapitre I

Analyse des conditions naturelles

Chapitre I : Analyse des conditions naturelles

I Introduction

Pour la mise en place d'un aménagement hydro-agricole, il est primordial, dans un premier temps, d'examiner les conditions climatiques. Cette étape permet d'obtenir une compréhension globale de la zone étudiée et d'évaluer précisément les besoins en eau des cultures au sein de notre périmètre. Par ailleurs, l'étude des facteurs géographiques et hydrologiques est également essentielle pour saisir leur influence sur le comportement des cultures, ainsi que pour optimiser la conception et le fonctionnement des infrastructures hydrauliques. Ce chapitre a donc pour objectif d'analyser les différentes caractéristiques climatiques, géographiques et géologiques de la zone d'étude, afin de guider le choix des cultures adaptées.

I.2 Présentation générale de la wilaya de khenchela

I.2.1 Situation géographique de la wilaya de Khenchela

La wilaya de Khenchela est située dans le Nord-Est de l'Algérie, dans les Hauts Plateaux. Elle s'étend sur une superficie d'environ **9 811 km²** et compte **8 daïras** et **21 communes**.

La wilaya de Khenchela est délimitée par :

- **Au nord** : Les wilayas d'Oum El Bouaghi et Batna ;
- **À l'est** : La wilaya de Tébessa ;
- **Au sud** : La wilaya d'El Oued ;
- **À l'ouest** : Les wilayas de Biskra et M'Sila

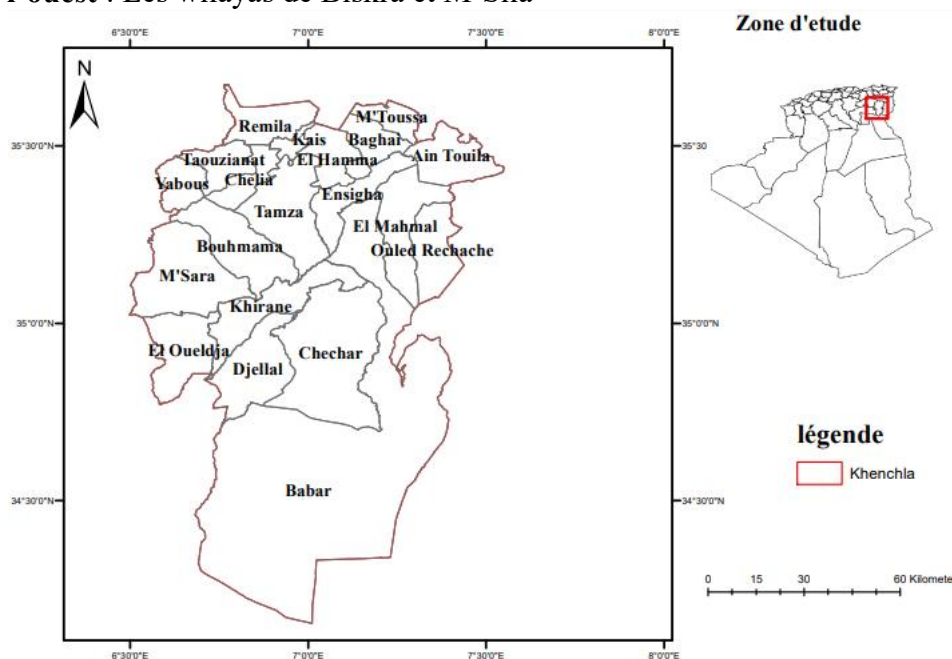


Figure I.1 : Carte de situation géographique de la wilaya de Khenchela.

I.2.2 Présentation du périmètre d'étude

*Périmètre d'irrigation d'El Mahmel Localisé au sud-est de la ville de Khenchela, à environ 10 km, ce périmètre tire son nom de la commune d'El Mahmel. Il se trouve au sud du chef-lieu communal et jouxte le tissu urbain,

y compris la station d'épuration (STEP).

*Limites du périmètre :

- Nord : Commune d'El Mahmel
- Sud : Chemin vicinal reliant la RN32 à la RN80
- Est : Route nationale RN48
- Ouest : Chef-lieu de la daïra et de la commune de Djamaa

Des cartes annexées illustrent la position géographique de la wilaya de Khenchela dans le nord algérien ainsi que la localisation d'El Mahmel au sein de cette wilaya.



Figure I.2 : localisation de périmètre El Mahmel (source : Earthstar Geographics SIO 2025)

I.3 Etude géologique :

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.

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.

I.4 Etude climatologique :

L'analyse des paramètres climatiques revêt une importance cruciale en irrigation, car elle permet d'optimiser l'utilisation des ressources hydriques. Ces facteurs, notamment la température, l'humidité atmosphérique, les précipitations et le vent, jouent un rôle déterminant dans le calcul des besoins hydriques des cultures et l'évaluation de la disponibilité en eau. Leur étude approfondie est essentielle pour garantir une gestion efficace de l'irrigation et assurer des rendements agricoles optimaux, en ajustant précisément les apports d'eau aux exigences des cultures et aux conditions environnementales.

I.4.1 Choix de la station météorologique

Tableau I.1 : Caractéristiques de la Station météorologique de yabous.

Station	Code	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période D'observations	Durée des Observations
Yabous Khenchela	123456	7,2°E	35,3°N	1200	1980-2023	43 ans

I.4.2 La température :

Ce facteur est déterminant pour l'évaluation du déficit hydrique, car il influence directement le calcul de l'évapotranspiration. Les températures correspondantes sont fournies dans le tableau I.2

Tableau I.2 : Températures moyennes mensuelles

Température	Mois												Année °C
	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	
moy (°C)	20	15	9.6	5.9	4.9	6.1	8.5	12	16	21	25	24.6	14.1
moy max (°C)	28	21	15	11	9.5	12	14	18.9	24	29	33	32.3	20.6
moy min (°C)	13	8.5	4.2	1.1	0.3	0.6	2.7	5	8.3	13	16	15.7	7.4

Source : ONM KHENCHLA

D'après les données de tableau I.2, on constate que la région del mahmel possède un climat tempéré méditerranéen. La période la plus chaude de l'année s'étend de Juin, Juillet et Août avec une température maximale de 34.9°C. Alors que la période la froide correspond aux mois de Janvier, Février et Mars avec une température minimale de 2.8°C.

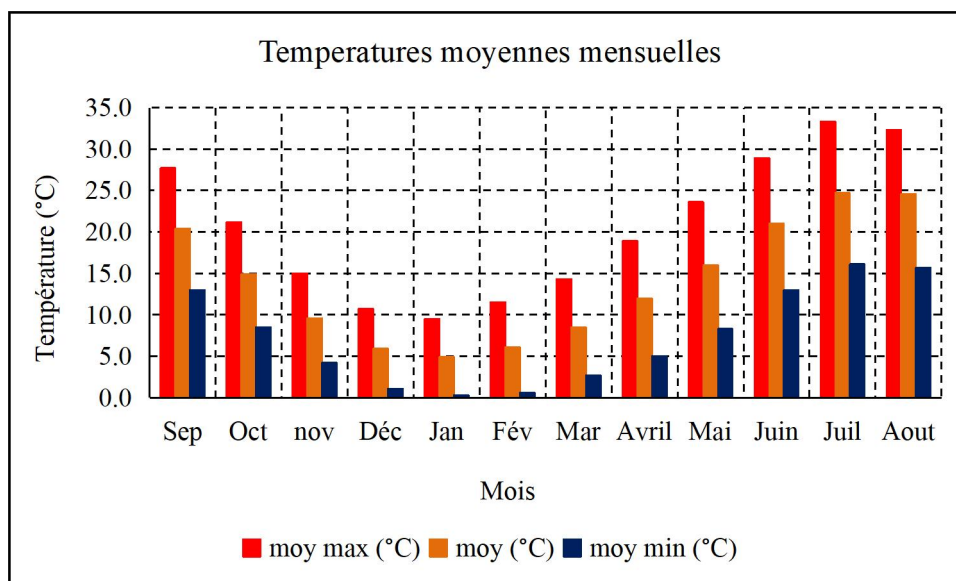


Figure I.3 : Evolution des températures mensuelles de l'air (Station yabous)

I.4.3 La pluviométrie:

L'analyse des précipitations est cruciale en irrigation, car elle offre une estimation du bilan hydrique requis et aide à définir les apports et les besoins en eau des cultures mensuellement

La répartition des pluies mensuelles est donnée dans le tableau I.3 :

tableau I.3 : les pluies mensuelles en mm

mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mars	avril	mai	juin	jul	aout	moy
Moy(mm)	41,3	31,5	38,7	37	43,9	33,2	47,4	38,1	50,3	27,2	15,9	41,56	446,06

(Source: ANRH 2024)

I.4.4 Le vent:

Les vents sont caractérisés par leur direction, leurs vitesses et leurs intensités, dans notre région les vents prédominants sont de direction Nord-Ouest qui soufflent surtout en hiver apportant des pluies, et Sud-Ouest c'est le vent chaud et sec qui engendre de fortes évapotranspirations, dont la vitesse moyenne est de 3.5 m/s.

Tableau I.4: Vitesses mensuelles du vent (2009-2021)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Moyenne
Vitesse moyenne du vent (m/s)	3.1	3.1	3.6	3.7	3.4	4	3.9	4.4	3.7	3.6	3	3.2	3.5

(Source : ONM 2009-2021)

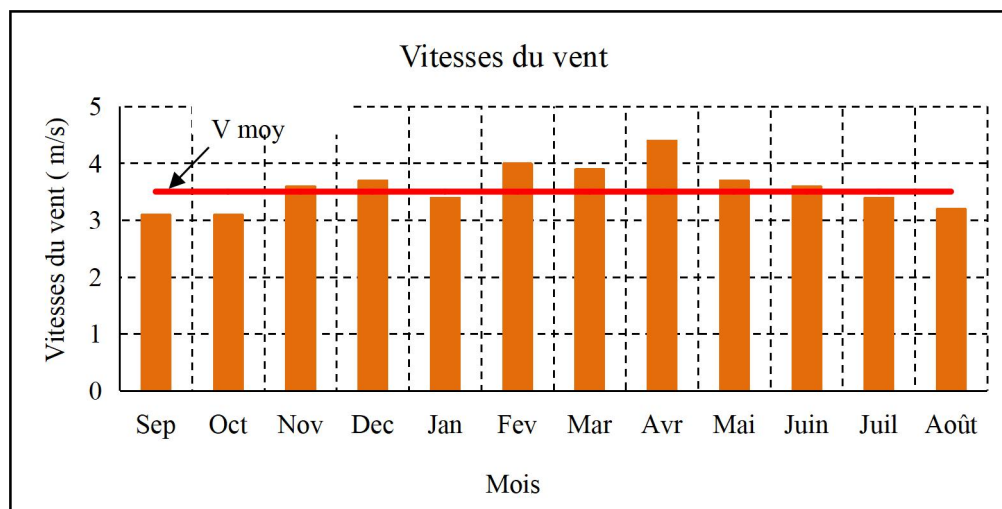


Figure I.4 : variation de la vitesse mensuelle du vent

D'après le tableau I.4, La vitesse moyenne mensuelle du vent observé oscille entre 3 m/s en juillet et 4.4 m/s en avril, la variation de vitesse du vent est moins importante.

I.4.5 L'humidité relative :

Il est important de connaître le taux l'humidité présent dans l'air (quantité de vapeur d'eau), puisqu'elle intervient dans le calcul de l'évapotranspiration

Tableau I.5: L'humidité relative moyenne mensuelle en % (2009-2021)

Humidité relative (%)	Mois												Année (%)
	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	
Hum Max (M)	57	72	79	86	85	80	72	59	54	50	45	49	66
Hum min (m)	32	44	52	56	56	53	45	34	34	29	22	23	40
(M + m) / 2	45	58	66	71	71	67	59	47	44	40	34	36	53

(Source : Carte ANRH)

D'après le tableau I.5 , on peut observer que l'humidité maximale correspond au mois de décembre soit **71%** et celle minimale est enregistré au mois juillet à savoir **34%**.

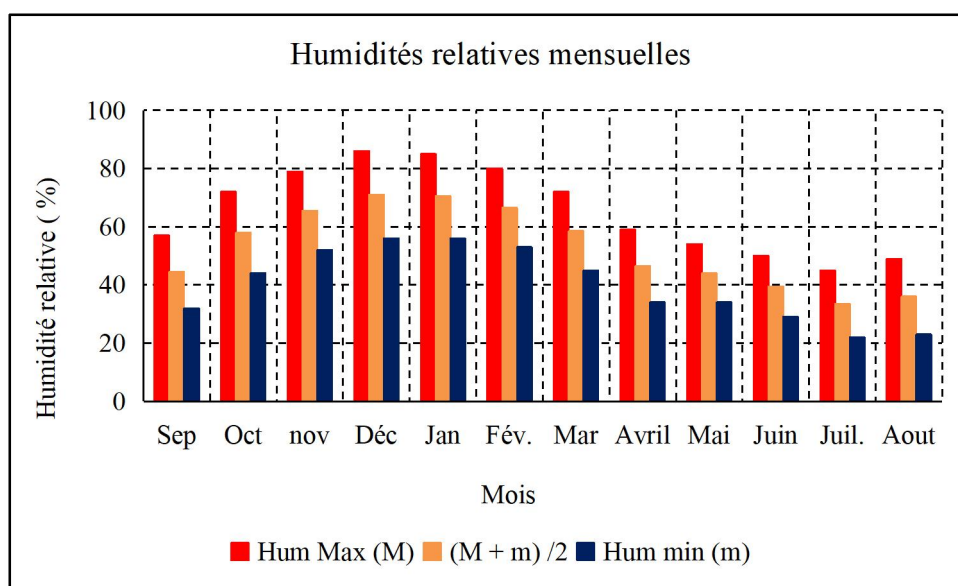


Figure I.5 : Variation mensuelle des taux d'humidité (maximums, moyens et minimums)

I.4.6 L'insolation :

L'insolation ou l'ensoleillement est la durée de la lumière de soleil dans une journée, elle implique la lumière du soleil direct non interrompue par les nuages. On peut mesurer l'insolation par l'héliographe type Campbell, elle est exprimée en heures.

Tableau I.6 : Durée d'insolations moyennes mensuelles en heures (2009-2001)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moyenne
Insolation (h/j)	7.8	6.9	5.7	4.8	5.3	5.8	7.0	7.7	8.2	9.1	9.9	9.4	7.3

(Source : ONM 2009-2021)

I.5 Calcul des indices Agro-météorologiques :

Les indices agro-météorologiques permettent de déterminer le contexte agro climatique en se basant sur différentes variables comme les précipitations et les températures dans le but de définir le type de climat et l'actions de ces variables sur les cultures.

Dans notre cas d'étude on distingue les trois indices suivants :

I.5.1 Indice d'aridité de Martonne :

Le géographe De. Martonne (1989) définit un indice d'aridité, calculé selon la formule suivante :

$$Ia = \frac{P}{T+10} \dots\dots\dots (I.1)$$

Avec :

Ia : Indice d'aridité

P : Précipitations moyennes annuelles : **446.1 (mm)**.

T: Températures moyennes annuelles : **14 (°C)**.

Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température (De. Martonne,), ce qui permet de connaître le degré de sécheresse de la région.

Du fait de sa simplicité, cet indice a été très largement utilisé par les géographes, il a des valeurs d'autant plus élevées que le climat est plus humide et des valeurs d'autant plus faibles que le climat est sec. De. Martonne a ainsi proposé la classification suivante :

Tableau I.7 : Classement de l'Indice d'aridité et type de Climat

Classement de l'Indice d'aridité	Type de climat
$I < 5$	Climat hyperaride
$5 < I < 7.5$	Climat désertique
$7.5 < I < 10$	Climat steppique
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat tempéré
$I > 30$	Climat humide

Commentaire des résultats

D'après la valeur de l'indice climatique qui est égale à **18.59** on voit que la région se caractérise par un climat semi-aride. Donc l'irrigation est généralement indispensable.

I.5.2 Quotient Ombrothermique d'Emberger :

Pour bien caractériser le climat de la région on utilisera encore le climagramme de L. Emberger sur lequel on reporte les données relatives à la zone d'étude. L'étage bioclimatique de la zone d'étude est ainsi déterminé, en appliquant la formule d'Emberger (1932) modifiée par Stewart en 1969.

$$Q3 = 3.43 \cdot \frac{P}{(M-m)} \dots \dots \dots (I.2)$$

$$Q3 = 46.37$$

Avec :

Q3: Quotient pluviométrique ;

P : Précipitation moyenne annuelle de **446.1 mm** ;

M : Moyenne des maximas de température du mois le plus chaude de l'année soit **33.3 (°C)** ;

m : Moyenne des minimas de température du mois le plus froid de l'année soit **0.3 (°C)** ;

En vertu du climagramme d'EMBERGER, La région d'étude se trouve dans l'étage bioclimatique (Semi-aride) à hiver frais et sec.

Tableau I.8 : Classification du climat d'après l'indice de Stewart

Valeur de Q	Type de climat
$Q > 100$	Humide
$100 > Q > 50$	Sub - humide
$50 > Q > 25$	Semi-aride
$25 > Q > 10$	Aride
$Q < 10$	Désertique

Commentaire du tableau :

D'après le tableau, on peut dire que le climat de notre région est dans la limite du semi-aride à hiver frais. Ainsi l'irrigation est indispensable dans la plupart des cas.

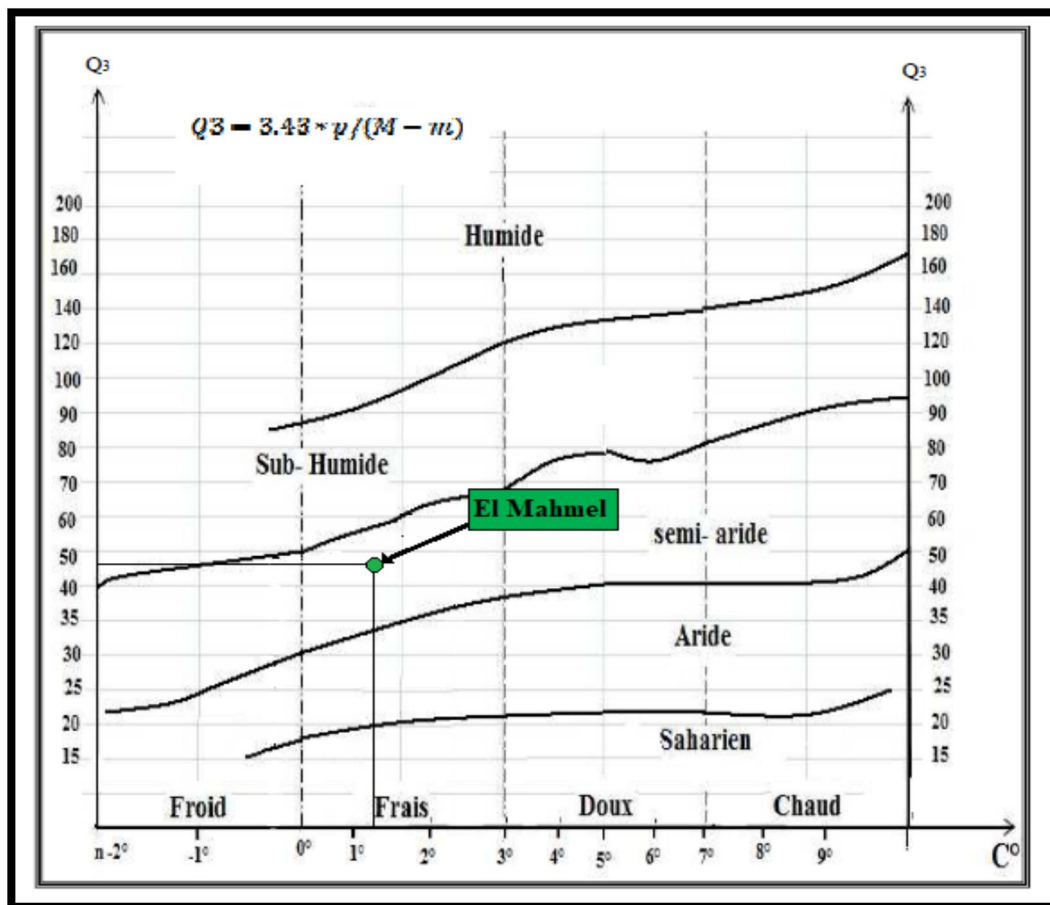


Figure I.6: Climagramme d'Emberger

I.5.3 Indice de Bagnouls et Gaussen :

Le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls est la combinaison de deux paramètres climatiques principaux, qui sont la température et la précipitation. Pour ces deux auteurs un mois sec est celui où le total moyen des précipitations exprimé en (mm) est inférieur ou égal au double de la température moyenne ($P = 2T^{\circ}\text{C}$). Cette relation permet d'établir un graphique sur lequel les précipitations sont portées à l'échelle double des températures. La détermination de cette période est d'une grande importance pour l'hydrogéologie afin de pouvoir estimer les besoins en eau.

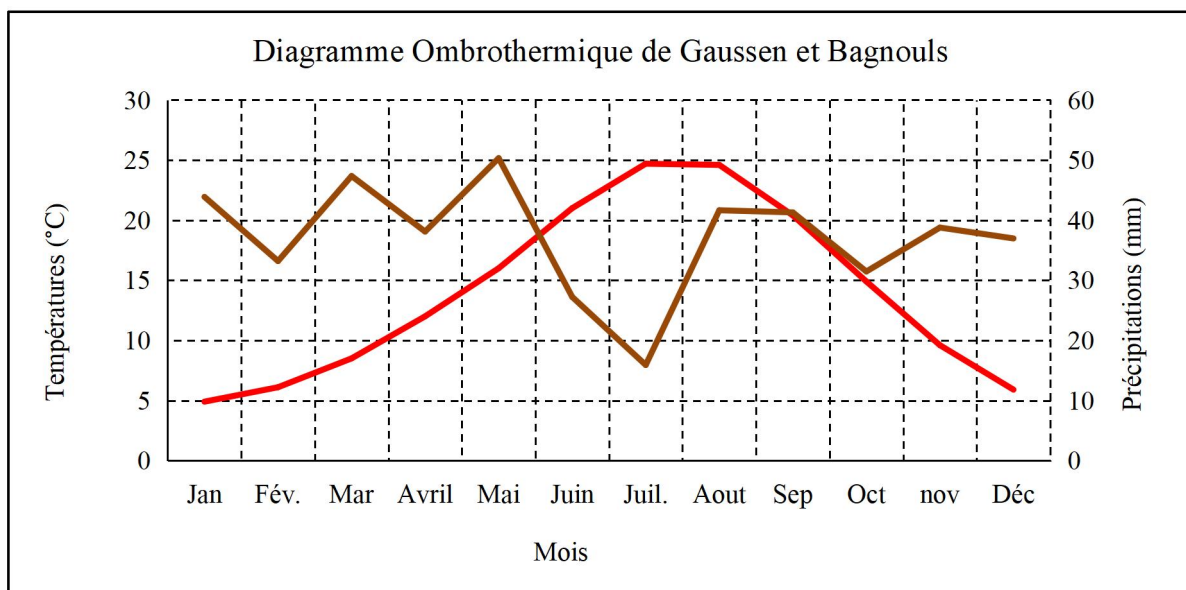


Figure I.7 :Diagramme Ombrothermique de la zone d'étude

D'après le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls le climat de la zone d'étude est caractérisé par deux périodes : la première sèche et la seconde humide. La période sèche est comprise entre le début du mois de Juin et la fin du mois de Septembre et celle humide s'étale du début du mois d'octobre à la fin du mois de Mai.

I.6 Etude socio-économique

La wilaya de Khenchela dispose d'un important potentiel agricole, favorisé par la diversité de ses reliefs et de ses climats. Elle se distingue notamment dans les filières céréalière, oléicole et arboricole fruitière, avec une extension progressive 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.

Conclusion:

Le périmètre de Del Mehmel, situé dans la wilaya de Khenchela, couvre une importante superficie agricole caractérisée par un climat semi-aride, avec des précipitations limitées et des températures élevées. Ces conditions climatiques accentuent les risques de sécheresse, posant ainsi un défi crucial pour la gestion des ressources hydriques et rendant l'irrigation indispensable pour assurer une productivité agricole viable.

La céréaliculture, activité économique majeure de la zone, repose sur une optimisation des systèmes d'irrigation et l'adoption de pratiques agricoles résilientes. Une gestion rationnelle de l'eau et l'introduction de techniques adaptées aux contraintes climatiques sont essentielles pour garantir la durabilité des rendements et soutenir le développement agricole de la région

Chapitre II

**Ressources en sol- Ressources en
eau**

Chapitre II : Ressources en sol- Ressources en eau**II.1 Introduction**

L'aménagement hydro-agricole d'un périmètre nécessite une analyse approfondie des deux ressources fondamentales que sont l'eau et le sol, ces dernières conditionnant directement le choix des cultures et des systèmes d'irrigation à mettre en place. Une telle étude implique d'évaluer les propriétés physiques du sol (structure et texture) ainsi que les caractéristiques chimiques et qualitatives de l'eau d'irrigation. Dans ce chapitre, nous nous attacherons donc à examiner en détail les propriétés pédologiques du périmètre d'étude ainsi que les paramètres qualitatifs de la ressource en eau disponible pour l'irrigation.

II.2 Ressources en eau :

Le périmètre irrigué d'El Mahmel (Khenchela) sera alimenté à partir des forages , qui constituent la principale source d'eau. Ces forages permettent d'assurer l'approvisionnement en eau pour une superficie estimée à 400 hectares. Le volume d'eau extrait alloué à l'agriculture est évalué à 2 299 500 m³/an, tandis qu'une partie de cette ressource pourra également être utilisée pour d'autres usages agricoles, contribuant ainsi à une gestion durable des ressources hydriques dans la wilaya de Khenchela

II.2.1Caractéristiques des forages:

.Tableau II.2:Caractéristiques des forages

Forage	Altitude	Niveau statique (m)	Débit de forage (L/s)
F1	1100	Artésien	16

Tableau II.3:Caractiristique chimique de l'eau d'irrigation de forage

Analyses	Résultats
Calcium Ca^{++} : méq/l	4.4
Magnésium: Mg^{++} : méq/l	3.2
Sodium: Na^{+} : méq/l	2.9
Potassium: K^{+} : méq/l	0.1
Chlorures: Cl^{-} : méq/l	1.5
Sulfates: SO_4^{-} : méq/l	2 .4
Carbonates: CO_3^{-} : méq/l	0.0
Bicarbonates: HCO_3^{-} : méq/l	6.6
Nitrates: NO_3^{-} : méq/l	0.1
Ph	8.37
Conductivité électrique à 25 °C (mmhos/cm)	0.72

(A.N.R.H Constantine)

II.3 Classification des eaux de l'irrigation :

La qualité de l'eau destinée à l'irrigation est évaluée selon trois paramètres fondamentaux :

1-**La salinité** : mesurée par la conductivité électrique (CE) exprimée en mmhos/cm ou dS/m

2-**L'alcalinité** : déterminée par le taux de carbonates et bicarbonates

3-**La toxicité** : évaluée par la concentration en éléments potentiellement nocifs

II.3.1 Risque lié à la salinité :

La salinité de l'eau d'irrigation, caractérisée par sa teneur en sels (sodium, sulfates et bicarbonates), est mesurée via la conductivité électrique (CE) à l'aide d'un conductimètre. Cette mesure, exprimée en dS/m ou mmhos/cm, permet d'évaluer son impact potentiel sur les cultures.

Le tableau suivant présente la classification américaine des risques liés à l'irrigation, basée sur le niveau de salinité de l'eau (conductivité électrique)

Tableau II.4 : Risque d'irrigation en fonction de la salinité.

Conductivité électrique (mmhos/cm)		Risque	Remarque
C1	$CE \leq 0,25$	Eau de risque faible	Convient pour toutes les cultures
C2	$0,25 < CE \leq 0,75$	Eau de risque moyen	Convient pour les plantes moyennement tolérantes
C3	$0,75 < CE \leq 2,25$	Eau de risque élevé	Ne convient qu'à des sols bien drainés et des plantes
C4	$CE > 2,25$	Eau de risque très élevé	Eau difficilement utilisable sur sol bien drainé

En revanche, pour le forage dont la CE est de 0,72 mmhos/cm, le tableau II.4 indique un risque moyen de salinité, ce qui signifie que l'eau convient aux plantes moyennement tolérantes.

II.3.2 Risque d'alcalinisation :

Une eau riche en sodium (Na) provoque une dispersion des argiles dans le sol, ce qui perturbe sa structure, et par conséquent le sol devient imperméable à long terme.

Le taux de sodium absorbé est calculé à partir des cations suivants : Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} en (méq/l),

est donné par le SAR :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} \dots\dots\dots (\text{II.1})$$

Avec :

- Na^+ : sodium dans la solution du sol en (méq/l) ;
- Ca^{++} : calcium dans la solution du sol en (méq/l) ;
- Mg^{++} : magnésium dans la solution du sol en (méq/l)

$$\text{Na}^+(\text{méq/l}) = \frac{\text{Na}^+ \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \text{valence}}{\text{masse molaire}} = \frac{115 \times 1}{22} = 5,227$$

$$\text{Ca}^{++}(\text{méq/l}) = \frac{\text{Ca}^{++} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \text{valence}}{\text{masse molaire}} = \frac{100 \times 2}{40} = 5$$

$$\text{Mg}^{++}(\text{méq/l}) = \frac{\text{Mg}^{++} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \times \text{valence}}{\text{masse molaire}} = \frac{60 \times 2}{24} = 5$$

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} = \frac{2,9}{\sqrt{\frac{4,4 + 3,2}{2}}} = 1,48$$

Tableau II.5: Risque d'irrigation en fonction d'alcalinisation.

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

D'après le tableau II.5, les eaux d'irrigation du forage ($CE = 0,72$ mmhos/cm) appartiennent à la **classe S1**, présentant un **faible risque d'alcalinisation**.

Le diagramme de classification des eaux de le forage se présentent comme suit :

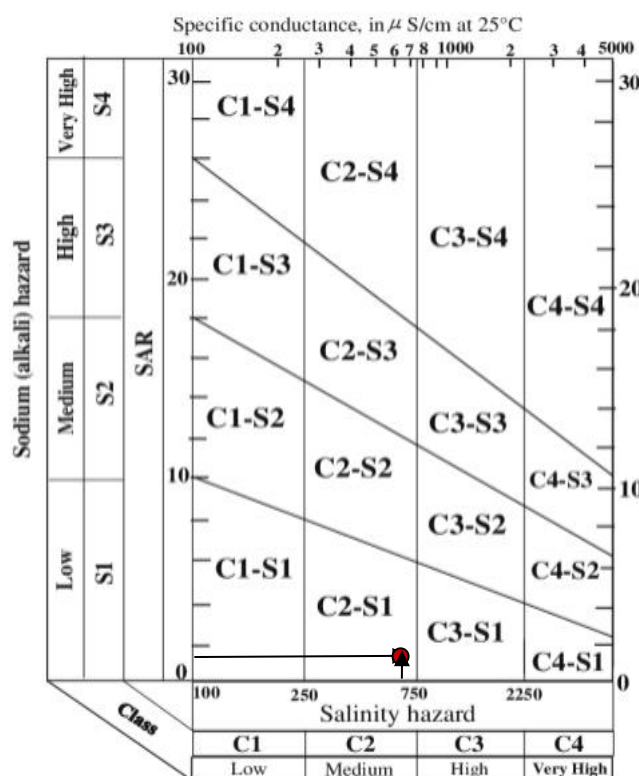


Figure II.1 : Diagramme de la classification des eaux d'irrigation de l'USSL (1954)

D'après la figure II.1 on note que le forage est de classe C2-S1 donc il est caractérisé par une salinité moyenne et une faible alcalinité

II.4 Ressources en sol :

II.4.1. Localisations et choix des profils pédologiques :

Profil (P)

Nombre : 1

Localisation : Nord-Ouest de la zone d'étude

Géomorphologie : glacis de collines

Pente : 1 à 2%

[20]

Végétation et utilisation du sol : vergers

Cailloux : négligeable

II.4.2. description morphologique du profil :

***H1 (0- 10 cm)** : recouvrement sec , brun clair , friable , porosité bonne structure grumeleuse à polyédrique fine émoussée , bien développé , limoneuse à limono –argileuse enracinement bon , vive effervescence Hcl généralisé .

* **H2(10 – 30) cm** : horizon sec , brun foncé, porosité assez bonne , friable , structure polyédrique moyenne anguleuse bien développé , texture argileux – limoneuse enracinement assez bon , vive effervescence Hcl généralisé .

***H3 (30 – 70) cm** : horizon sec , brun foncé,friable,porosité moyenne assez bonne structure plus élargie : polyédrique grossière anguleuse associer à polyédrique moyenne bien développé , vive effervescence Hcl généralisé.

***H4 (70- 120) cm** : niveau d'accumulation du calcaire , beige jaunâtre clair avec nombreux amas blancs, friable calcaire, structure polyédrique moyenne anguleuse bien développé, texture argilo limoneuse à équilibrer , très vive effervescence Hcl généralité.

Classification :

-les sols dominants de la région sont brun calcaire, caractérisés par un taux satisfaisant en matière organique avec un pourcentage de calcaire actif voisin de 15%

Pour les analyses du sol ont été effectués par (samaï .W, thèse ing. Batna. 1997).

II.4.3. résultats des analyses de sol:

Tableau II.6 : Caractéristiques physico – chimiques :

Horizons (cm)	H ₁ (0 – 10)	H ₂ (10 – 30)	H ₃ (30 – 70)	H ₄ (70 – 120)
---------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------

Granulométrie :

A %	33 .48	45.30	45.90	48.78
L F %	45.42	19.53	38.70	35.94
L G %	15.32	31 .52	12.83	10.91
S F %	4 .20	2.39	2.13	3.14
S G %	1.58	1.27	0 .44	0.54
Texture	Limono argileuse	Argilo limoneuse	Argilo limoneuse	Argilo limoneuse

Matières organiques :

M O %	1.56	2.21	1.16	0.82
C %	0.68	1. 29	0 .91	1 .06
N %	0.10	0.15	0.12	0.09
C / N	6.8	8 .6	7.58	11.77

Réserves minérales :

Ca Co₃ totale (%)	38.59	37.38	40.49	36.68
Ca Co₃ actif (%)	12.5	12	16.5	18.5
P₂ O₅ assimilable (PPM)	60	20	20	-

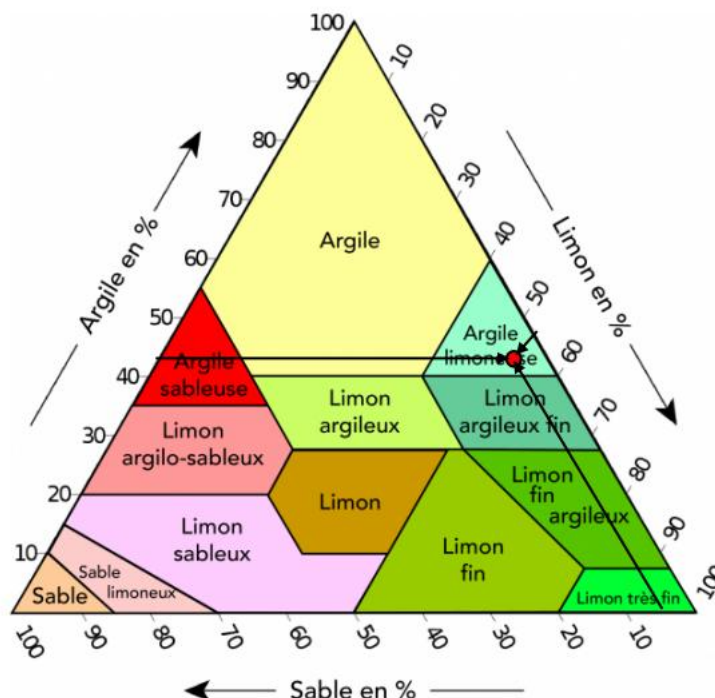
Complexe adsorbant

Na⁺ en méq / 100g	0.34	0.13	0.11	0.32
K⁺ en méq / 100g	0.70	0.65	0.59	0.60

Solution de sol

P H	8.30	8.40	8.40	8.30
Conductivité mmhos / cm	0.61	0.47	0.45	0.47
C.E.C (méq / 100gde sol)	24.6	35.2	33.6	32

Source de la pépinière

II.4.3.1 Interprétations des résultats :**Figure II.2 : Analyse texturale des sols étudiés**

D’après les résultats, le sol présente une texture argilo-limoneuse dominante (H2 à H4), avec un horizon superficiel (H1) de type limono-argileux. Cette texture, projetée dans le triangle USDA, confère au sol une bonne rétention en eau et en nutriments, favorable aux cultures.

On observe une teneur en matière organique faible à modérée (1.56 % en H1, 2.21 % en H2, puis diminution avec la profondeur), associée à un déficit en azote (N < 0.15 %) et un rapport C/N équilibré (6.8–11.77), indiquant une minéralisation lente.

Les propriétés hydrodynamiques sont résumées dans le tableau II.7 :

Tableau II.7: Propriétés hydrodynamiques des sols

Texture	limoneux argileuse
Capacité au champ (%)	25,6%
Point de flétrissement (%)	19%
Vitesse d’infiltration	10-15mm/h
Densité apparente	1.4

II.5 Calcul de la pluie de projet:

Le calcul de l'apport pluviométrique a pour but de définir les précipitations de courte et de longue durée qui peuvent inonder le périmètre à étudier.

II.5.1 Choix de la station pluviométrique :

L’observation des précipitations de la plaine d’El Mahmel se fait par la station météorologique de yabous qui a les caractéristiques suivantes :

Tableau II .8 : Caracéristiques de la station pluviométrique

Station	Code	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période D’observations	Durée des Observations
Yabous Kenhela	123456	7,2°E	35,3°N	1200	1980-2023	43 ans

Les données pluviométriques de la station yabous pour la période de 1993-2024 sont présentées dans l’histogramme suivant:

Précipitation (mm)	Mois												Année (mm)
	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	
1993/94	18.7	15.8	27.0	25.4	16.0	18.5	16.1	18.2	46.3	81.3	0.0	0.0	283.3
1994/95	4.0	10.2	42.8	16.9	6.7	18.4	24.5	27.9	31.7	43.9	12.8	104.1	343.9
1995/96	35.0	7.0	12.2	23.9	167.6	0.0	70.2	69.4	106.9	11.0	2.6	23.0	528.8
1996/97	9.9	11.4	66.8	40.0	5.8	19.3	91.8	55.1	29.9	5.8	33.3	14.3	383.4
1997/98	16.2	45.5	32.0	17.2	64.9	23.1	56.7	33.0	84.7	5.9	23.3	14.6	417.1
1998/99	45.2	11.9	49.3	52.5	10.5	22.6	48.0	7.2	20.8	4.4	0.0	5.4	277.8
1999/00	15.2	1.8	10.1	31.4	45.9	8.8	48.1	24.6	1.8	1.5	8.6	38.1	235.9
2000/01	42.4	38.7	5.7	15.8	62.5	1.5	69.9	15.0	2.8	18.7	23.6	10.8	307.4
2001/02	42.6	38.3	9.8	19.4	71.0	154.1	75.0	48.7	5.5	24.0	16.7	5.0	510.1
2002/03	23.7	0.0	2.5	13.7	18.2	3.9	8.6	25.5	11.4	2.4	0.0	28.9	138.8
2003/04	47.4	56.3	77.7	61.6	6.8	36.8	48.5	17.5	47.7	24.4	0.5	2.6	427.8
2004/05	15.5	26.6	40.1	25.6	78.5	24.6	11.3	2.8	18.3	9.4	0.0	0.2	252.9
2005/06	16.4	6.5	80.3	95.9	12.2	4.4	10.0	2.5	46.6	23.5	0.0	5.0	303.3
2006/07	31.5	11.3	6.4	5.2	36.7	0.0	3.2	5.8	29.4	0.0	2.6	15.5	147.6
2007/08	69.6	30.8	18.7	13.4	14.1	22.7	34.1	14.0	31.6	21.0	12.0	41.1	323.1
2008/09	10.4	15.3	88.3	29.6	83.3	45.9	29.1	91.3	16.7	56.7	2.8	0.0	469.4
2009/10	86.0	47.1	22.4	29.7	16.2	8.5	42.8	42.0	138.3	51.0	13.1	37.4	534.5
2010/11	30.4	5.1	87.7	103.3	15.7	26.0	15.6	39.6	7.6	55.2	25.9	1.6	413.7
2011/12	35.3	12.7	36.9	48.1	67.9	40.3	4.6	45.0	117.9	47.6	37.4	16.1	509.8
2012/13	41.5	21.6	22.3	65.0	6.2	26.3	72.2	63.6	27.6	3.3	0.6	43.7	393.9
2013/14	96.6	27.2	8.6	46.3	2.8	3.9	12.4	10.0	89.8	5.6	77.8	62.5	443.5
2014/15	66.4	41.3	9.1	29.0	85.9	12.9	55.8	78.5	27.2	1.8	10.0	21.9	439.8
2015/16	65.3	9.9	3.6	12.0	42.9	24.7	19.9	23.8	32.3	30.5	34.0	9.1	308.0
2016/17	42.5	26.6	55.9	9.1	18.3	71.3	111.6	52.1	127.2	22.5	24.7	48.2	610.0
2017/18	36.9	130.7	19.7	19.5	17.1	43.1	41.2	47.5	17.7	5.1	25.1	37.4	441.0
2018/19	55.2	21.8	27.9	8.9	40.8	18.3	21.3	41.5	35.2	8.0	77.3	115.2	471.4
2019/20	68.6	76.1	81.6	66.8	159.3	60.8	234.6	11.1	57.6	78.3	0.0	25.7	920.5
2020/21	26.2	32.2	47.2	111.9	72.0	130.5	92.5	6.6	56.8	55.7	8.3	231.7	871.6
2021/22	78.0	81.0	56.5	0.0	25.0	15.0	26.9	126.4	69.0	6.1	2.5	9.9	496.3
2022/23	87.7	46.5	80.7	55.7	78.3	33.3	10.5	59.2	70.4	61.7	5.0	45.7	634.7
2023/24	19.9	68.2	72.1	53.1	11.2	109.6	60.9	75.9	153.3	77.9	12.5	276.5	991.1

Les paramètres statistiques de la série sont détaillés comme suit :

Tableau II.9 : Paramètres de la série pluviométrique

paramètre	résultat
Moyenne	446
écart-type	200
coefficient de variation	0.449
pluie moyenne annuelle max	991
pluie moyenne annuelle min	139
Médian	428

II.5.2 Analyse de l'homogénéité des données pluviométriques :

L'analyse d'homogénéité des séries pluviométriques constitue une étape fondamentale pour s'assurer de la cohérence et de la comparabilité temporelle des données. Cette vérification permet de garantir la fiabilité des études climatiques et hydrologiques qui s'appuient sur ces informations. Dans notre recherche, nous avons recouru au test de Mood, une méthode statistique robuste spécialement adaptée pour détecter d'éventuelles ruptures ou discontinuités dans les séries de précipitations..

II.5.2.1 Test de Mood

Dans notre étude, nous appliquons le test de Mood, méthode statistique essentielle pour évaluer l'homogénéité des séries pluviométriques.

Cette analyse consiste à remplacer les valeurs brutes de la série par une séquence de signes (+/-) basée sur leur position par rapport à la médiane, permettant ainsi de détecter d'éventuelles ruptures dans la distribution des données:

- "+" 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 "-".

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

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

$$T_s < 3.3 (\log 10N + 1) \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

Tableau II.10 : Résultat du test Mood

Pmoy	283.3	343.9	528.8	383.4	417.1	277.8	235.9	307.4	510.1	138.8	427.8
Signes	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-
Pmoy	252.9	303.3	147.6	323.1	469.4	534.5	413.7	509.8	393.9	443.5	439.8
Signes	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+	+
Pmoy	308	610	441	471.4	920.5	871.6	496.3	634.7	991.1		
Signes	-	+	+	+	+	+	+	+	+		

D'après le tableau on a : Nombre total de séquences (Ns) = 15

Taille de la plus grande série consécutive (Ts) = 8

$$10.63 < NS < 21.37$$

$$Ts < 8.22$$

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

II.5.3 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 :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} \dots \dots \dots (II.4)$$

Avec :

u= variable réduite de Gauss égale à :

$$u = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \dots \dots \dots (II.5)$$

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

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} \dots \dots \dots (II.6)$$

Avec :

$$U = \log x \dots \dots \dots (II.7)$$

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

II.5.3.1 Test de validité d'un ajustement :

Après l'ajustement des données aux différentes lois de distribution, une étape cruciale consiste à vérifier la qualité de cet ajustement. Pour ce faire, nous avons recouru au test du Khi-deux (χ^2) comme critère de validation. Selon cette méthode, une loi est considérée comme adaptée si la condition suivante est respectée :

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

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

Tableau II.11 : Test de validité des deux ajustements

Paramètre	La loi normale	La loi log-normale
KHI carré χ^2 calculé	9.42	4.9
Degré de liberté	4	4
χ^2 théorique	9.49	9.49

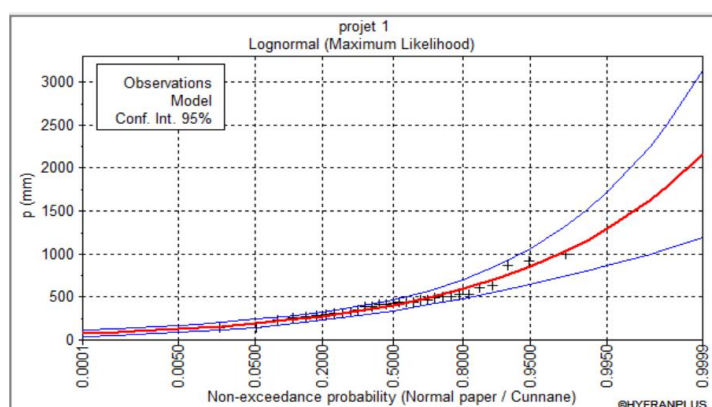
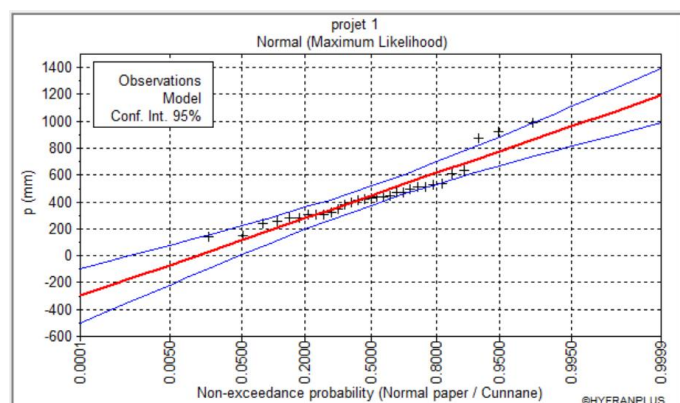


Figure II.3 : Ajustement des Précipitations moyennes annuelles aux lois normale et Log-Normale

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

II.5.4. Détermination de l'année de calcul :

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

Tableau II.12 : Résultat de l'ajustement

T	q	Xt	intervalle de confiance
2	0.5	446	376-517
1.25	0.2	277	195-360

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

$$P_{\text{moy}80\%} = P_{\text{moy}} \times \frac{P_{\text{théorique}}(80\%)_{\text{annuell}}}{P_{\text{théorique}}(50\%)_{\text{annuelle}}} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Donc :

$$P_{\text{moy}80\%} = P_{\text{moy}} \times 0,7$$

Tableau II.13 : Calcul des pluies mensuelles pour l'année sèche (freq= 80%)

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P_{moy80%} (mm/mois)	28,9	22,02	27,14	25,8	30,7	23,2	33,15	26,67	35,2	19,1	11,1	29,16
P_{eff} (mm)	20,23	15,414	18,99	18,1	21,5	16,3	23,2	18,66	24,6	13,3	7,79	20,4

II.5 Conclusion:

La caractérisation des ressources en sols et en eaux est cruciale pour une gestion optimale du périmètre d'El Mahmel. L'analyse pédologique a mis en évidence un sol à texture argilo-limoneuse, riche en calcaire et faiblement salin, mais dont la fertilité est limitée par un déficit en matière organique et en azote, ce qui requiert des amendements ciblés afin d'améliorer son potentiel agricole. Concernant les ressources hydriques, l'étude hydrologique a révélé une pluviométrie insuffisante et irrégulière. Le périmètre sera approvisionné par des forages situés à proximité de la zone étudiée, ces sources d'eau présentant une qualité satisfaisante avec une salinité modérée.

Chapitre III

Besoins en eau du Périmètre

Chapitre III : Besoins en eau des cultures

III.1 Introduction

La gestion optimale de l'eau dans un périmètre irrigué repose avant tout sur une évaluation précise des besoins en eau des cultures concernées. Cette étape est cruciale pour assurer une utilisation efficiente des ressources hydriques tout en garantissant la pérennité des infrastructures agricoles. Le présent chapitre a pour objectif de déterminer la quantité totale d'eau requise pour l'ensemble des cultures du périmètre, en tenant compte des principaux facteurs influents tels que le climat local, les caractéristiques pédologiques, ainsi que la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation. À partir des analyses et données collectées, nous définirons un cadre solide visant à orienter une gestion rationnelle de l'irrigation, alliant productivité agricole et conservation durable des ressources en eau.

III.2 Besoins en eau du périmètre :

L'estimation des besoins en eau d'un périmètre irrigué permet de définir le volume requis selon les conditions climatiques, les caractéristiques du sol et l'efficacité du système d'irrigation. Une gestion optimisée assure une utilisation responsable de l'eau, soutenant ainsi le développement des cultures et la pérennité des pratiques agricoles.

III.2.1 Estimation des besoins en eau pour l'irrigation :

Le calcul des besoins en irrigation pour une culture s'appuie sur le bilan hydrique suivant :

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

où :

-ETM représente l'évapotranspiration maximale, c'est-à-dire les besoins en eau de la culture (exprimés en mm). Elle est calculée par la formule :

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

-Kc désigne le coefficient cultural, variable selon la culture considérée,

-Peff correspond à la pluviométrie efficace, c'est-à-dire la part des précipitations réellement exploitable par la plante,

-Rs est la réserve utile du sol, définie comme la quantité d'eau retenue dans le sol et accessible aux racines.

III.2.2 L'évapotranspiration de référence (ET₀) :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est définie comme la quantité maximale d'eau pouvant être évaporée par évapotranspiration sous un climat donné, à partir d'un couvert végétal continu, bien alimenté en eau. Elle comprend à la fois l'évaporation du sol et la transpiration de la végétation. L'évapotranspiration de référence (ET₀) correspond précisément à la quantité d'eau évaporée et transpirée par une surface végétale standardisée, généralement un gazon ras en pleine croissance,

couvrant entièrement le sol, disposant d'un apport hydrique suffisant, et implanté sur une parcelle assez vaste pour éviter les effets de bordure.

L'estimation de l'ET₀ peut être réalisée selon deux grandes méthodes :

- Les méthodes directes, qui consistent à mesurer sur le terrain l'évapotranspiration à l'aide d'appareils spécifiques,
- Les méthodes indirectes, qui utilisent des formules empiriques fondées sur des paramètres climatiques.

Cette double approche permet d'adapter les mesures ou estimations selon les contraintes et les objectifs de l'étude hydrologique ou agronomique.

III.2.2.1 Les méthodes directes :

Les méthodes directes d'estimation de l'évapotranspiration utilisent des instruments comme la cuve lysimétrique, un récipient enterré mesurant les variations d'eau dans le sol et le drainage, complété par des données pluviométriques, pour calculer précisément les pertes d'eau d'une culture. Le bac évaporant mesure quant à lui l'évaporation de l'eau exposée au climat, sans prendre en compte la transpiration des plantes. Ces méthodes permettent d'obtenir des mesures fiables en conditions réelles.

III.2.2.2 Les méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes estiment l'ET₀ à partir de formules utilisant des paramètres climatiques comme la température, le vent, l'humidité et l'ensoleillement. Bien que plusieurs formules existent, certaines donnent des résultats souvent imprécis ou divergents. Dans notre étude, l'ET₀ a été calculée à l'aide de l'équation de Penman-Monteith, recommandée par la FAO et largement adoptée en irrigation

La formule de Penman-Monteith est la suivante :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma T_{cste} + 273u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots\dots\dots III.3$$

Avec :

ET₀ : évapotranspiration de référence [mm/ jour].

R_n : rayonnement net à la surface de la culture [MJ m-2/ jour].

G : densité de flux de chaleur dans le sol [MJ m-2 /jour].

T : température journalière moyenne de l'air à une hauteur de 2 m [°C].

u₂: vitesse du vent à une hauteur de 2 m [m/s].

e_s: pression de vapeur saturante [kPa].

e_a: pression de vapeur réelle [kPa].

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante [kPa °C-1].

γ: constante psychrométrique [kPa °C-1].

Pour le calcul de l'ET₀, nous avons utilisé le logiciel CROPWAT (FAO, 2008), qui s'appuie sur la méthode modifiée de Penman-Monteith. Ce logiciel intègre des données climatiques mensuelles précises pour fournir des estimations fiables. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau III.1

Pays algerie		Station yabous					
Altitude 1200 m.	Latitude 35.30 °N		Longitude 7.20 °E				
Mois	Temp Min	Temp Max	Humidité	Vent	Insolation	Ray.	ET ₀
	°C	°C	%	m/s	heures	MJ/m ² /jour	mm/jour
Janvier	0.3	9.5	71	3.4	5.3	9.4	1.44
Février	0.6	12.0	67	4.0	5.8	11.9	2.06
Mars	2.7	14.0	59	3.9	7.0	16.1	2.90
Avril	5.0	18.9	47	4.4	7.7	19.6	4.55
Mai	8.3	24.0	44	3.7	8.2	21.8	5.56
Juin	13.0	29.0	40	3.6	9.1	23.6	6.84
Juillet	16.0	33.0	34	3.0	9.9	24.4	7.49
Août	15.7	32.3	36	3.2	9.4	22.4	7.21
Septembre	13.0	28.0	45	3.1	7.8	17.9	5.45
Octobre	8.5	21.0	58	3.1	6.9	13.9	3.42
Novembre	4.2	15.0	66	3.6	5.7	10.2	2.21
Décembre	1.1	11.0	71	3.7	4.8	8.3	1.55
Moyenne	7.4	20.6	53	3.6	7.3	16.6	4.22

Tableau III.1: Evapotranspiration de référence ET₀ calculée par logiciel CROPWAT.

III.2.3 Calcul de la pluie efficace :

La pluie efficace correspond à la fraction des précipitations réellement absorbée par le sol et utilisée par les cultures, après déduction des pertes dues à l'évaporation et au ruissellement. Cette valeur, exprimée en millimètres, dépend de plusieurs facteurs tels que la zone climatique, le type de précipitations et la nature du sol. Dans le cadre de notre étude, caractérisée par un climat semi aride, l'estimation de la pluie efficace a été réalisée selon la méthode du pourcentage fixe, exprimée par la relation suivante :

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

Avec : α : coefficient de pertes dans notre cas il est égal 0.7

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

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P _{moy80%} (mm/mois)	28,9	22,02	27,14	25,8	30,7	23,2	33,15	26,67	35,2	19,1	11,1	29,16
P _{eff} (mm)	20,23	15,414	18,99	18,1	21,5	16,3	23,2	18,66	24,6	13,3	7,79	20,4

III.2.4 Calcul de la réserve en eau du sol (RS_i) :

Le sol agit comme un réservoir d'eau pour les cultures, avec une disponibilité variable selon son degré d'humidité, qui dépend principalement des caractéristiques du sol et du type de culture. La réserve en eau du sol (Rs) est définie par la relation suivante :

$$Rs = K \times RFU \dots \dots \dots (III.5)$$

Le coefficient k varie en fonction des conditions climatiques du mois précédent : il est nul lors de mois chauds et secs, égal à 1 pour des mois très froids et humides, et prend des valeurs intermédiaires par exemple $\frac{1}{2}$ pour l'arboriculture et $\frac{1}{3}$ pour les cultures céréalières et maraîchères lorsque l'évapotranspiration est proche de la pluie efficace.

La réserve en eau facilement utilisable **RFU** correspond à la quantité d'eau disponible entre la capacité au champ (point de ressuyage) et le point de flétrissement végétatif, c'est-à-dire quand l'humidité du sol est suffisante pour que les plantes puissent temporairement éviter le flétrissement. Elle est calculée selon la formule :

$$RFU = (h_{cc} - h_{pf}) \times Y \times Da \times Z \dots \dots \dots III.6$$

Hcc : humidité à la capacité au champs.

Hpf : humidité au point de flétrissement.

Y : degré de tarissement de sol, en général on prend ($Y=2/3$).

Z : profondeur racinaire en mm.

Da : densité apparente du sol.

III.3.1 Occupation des sols:

Avant d'estimer les besoins en eau des cultures dans la zone d'étude, il faut d'abord définir l'occupation et la répartition des cultures en tenant compte des contraintes climatiques, sociales et agro-pédologiques. Le scénario d'occupation du sol est présenté dans un tableau spécifique. Dans les zones semi arides, la production agricole repose sur des choix stratégiques adaptés aux contraintes climatiques et hydriques, avec une importance particulière accordée aux cultures maraîchères et céréalières irriguées, qui sont des aliments de base bien adaptés au stress hydrique

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

Culture	Céréales (%)	Maraichage (%)	Arboriculture (%)	Fourragères (%)	Total (%)
Pourcentage	30	40	20	10	100

Les Cultures proposées sont résumées dans le tableau III.4

Tableau III.4 : Système de cultures proposées

Céréaliculture	Cultures maraichères	Cultures arboricoles	Fourragères
Blé d'hiver	Pomme de terre	Olivier	Sorgho
Orge en vert	Courgette	Vignes	Avoine
Blé	Tomate		
Orge grain	Oignon		
	Haricot		
	Ail		

III.3.2 Assolements des cultures :

L'assolement correspond à la rotation successive de différentes cultures sur une même parcelle au fil du temps. Cette pratique agricole contribue à préserver et à améliorer la fertilité des sols saison après saison. Par ailleurs, l'assolement peut également désigner la variété des cultures présentes dans une région donnée à un moment précis

Tableau III.5 : Assolement proposé pour le périmètre el mehmel

Assolement 1	Assolement 2
Blé	Orge en vert
Orge grain	Blé d'hiver
Oignon	Tomate
Ail	Tomate
Pomme de terre (S)	Haricot (s)
Pomme de terre (AS)	courgette
Tomate	Oignon
Arboriculture olivier vigne	Arboriculture olivier vigne
Sorgho	Avoine

III.4. Estimation des coefficients culturaux (Kc) :

Le coefficient cultural (Kc), dépendant du type de culture, de son stade de croissance et des conditions climatiques, permet d'estimer l'évapotranspiration réelle (ETM) à partir de l'évapotranspiration de référence (ET0) via la formule $ETM = ET0 \times Kc$. Cette estimation, basée sur les valeurs établies par Doorenbos (FAO, 2003), est essentielle pour optimiser la gestion de l'irrigation en évitant stress hydrique et gaspillage d'eau. **(Annexe N°1)**

III.5. Estimation des besoins en eau des cultures choisies :

Pour chaque culture on calcule les besoins suivant son stade végétatif :

III.5.1 Estimation des besoins en eau des céréales :**Tableau III.7 :** Calcul des besoins en eau pour le blé d'hiver

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45	0,1	6,16	0	0,25	26,61	11,20
Nov	27,14	19,00	66,8	0,25	15,4	0	0,4	26,72	7,72
Dec	25,87	18,11	48,83	0,35	21,56	0	0,7	34,18	16,07
Jan	30,72	21,50	45,66	0,5	30,8	0	0,85	38,81	17,31
Fev	23,24	16,27	58,63	0,6	36,96	0	0,95	55,70	39,43
Mars	33,15	23,21	91,33	0,6	36,96	0	1	91,33	68,13
Avr	26,67	18,67	136,82	0,6	36,96	0	0,85	116,30	97,63
Mai	35,22	24,65	171,96	0,6	36,96	0	0,7	120,37	95,72
Juin	19,06	13,34	203,05	0,6	36,96	0	0,35	71,07	57,73
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.8 : Calcul des besoins en eau pour le blé

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45	0,1	6,16	0	0,25	26,61	11,20
Nov	27,14	19,00	66,8	0,3	18,48	0	0,4	26,72	7,72
Dec	25,87	18,11	48,83	0,5	30,8	0	0,6	29,30	11,19
Jan	30,72	21,50	45,66	0,6	36,96	0	0,85	38,81	17,31
Fev	23,24	16,27	58,63	0,6	36,96	0	0,95	55,70	39,43
Mars	33,15	23,21	91,33	0,6	36,96	0	1	91,33	68,13
Avr	26,67	18,67	136,82	0,6	36,96	0	0,9	123,14	104,47
Mai	35,22	24,65	171,96	0,6	36,96	0	0,7	120,37	95,72

Juin	19,06	13,34	203,05	0,6	36,96	0	0,4	81,22	67,88
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.9 : Calcul des besoins en eau pour l'orge en grain.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45						
Nov	27,14	19,00	66,8	0,3	18,48	0	0,4	26,72	7,72
Dec	25,87	18,11	48,83	0,5	30,8	0	0,6	29,30	11,19
Jan	30,72	21,50	45,66	0,6	36,96	0	0,75	34,25	12,74
Fev	23,24	16,27	58,63	0,6	36,96	0	0,9	52,77	36,50
Mars	33,15	23,21	91,33	0,6	36,96	0	0,95	86,76	63,56
Avr	26,67	18,67	136,82	0,6	36,96	0	0,75	102,62	83,95
Mai	35,22	24,65	171,96	0,6	36,96	0	0,6	103,18	78,52
Juin	19,06	13,34	203,05	0,6	36,96	0	0,4	81,22	67,88
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

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

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45						
Nov	27,14	19,00	66,8	0,2	12,32	0	0,3	20,04	1,04
Dec	25,87	18,11	48,83	0,45	27,72	0	0,4	19,53	1,42
Jan	30,72	21,50	45,66	0,6	36,96	0	0,7	31,96	10,46
Fev	23,24	16,27	58,63	0,6	36,96	0	0,85	49,84	33,57
Mars	33,15	23,21	91,33	0,6	36,96	0	0,95	86,76	63,56
Avr	26,67	18,67	136,82	0,6	36,96	0	0,75	102,62	83,95
Mai	35,22	24,65	171,96	0,6	36,96	0	0,55	94,58	69,92
Juin	19,06	13,34	203,05						
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

III.5.2. Estimation des besoins en eau des maraîchages :

Tableau III.11 : Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre (AS)

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03	0,2	12,32	0	0,5	81,02	60,79
Oct	22,02	15,41	106,45	0,4	24,64	0	0,7	74,52	59,10
Nov	27,14	19,00	66,8	0,5	30,8	0	1	66,80	47,80
Dec	25,87	18,11	48,83	0,5	30,8	0	0,75	36,62	18,51
Jan	30,72	21,50	45,66						
Fev	23,24	16,27	58,63						
Mars	33,15	23,21	91,33						
Avr	26,67	18,67	136,82						
Mai	35,22	24,65	171,96						
Juin	19,06	13,34	203,05						
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.12 : Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre (Saison)

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45						
Nov	27,14	19,00	66,8						
Dec	25,87	18,11	48,83						
Jan	30,72	21,50	45,66						
Fev	23,24	16,27	58,63	0,25	15,4	0	0,5	29,32	13,05
Mars	33,15	23,21	91,33	0,5	30,8	0	0,7	63,93	40,73
Avr	26,67	18,67	136,82	0,5	30,8	0	1	136,82	118,15
Mai	35,22	24,65	171,96	0,5	30,8	0	0,75	128,97	104,32
Juin	19,06	13,34	203,05						
Juill	11,13	7,79	228,74						

Aout	29,16	20,41	220,03						
-------------	--------------	-------	--------	--	--	--	--	--	--

Tableau III.13 : Calcul des besoins en eau pour la tomate

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45						
Nov	27,14	19,00	66,8						
Dec	25,87	18,11	48,83						
Jan	30,72	21,50	45,66						
Fev	23,24	16,27	58,63						
Mars	33,15	23,21	91,33	0,6	36,96	0	0,5	45,67	22,46
Avr	26,67	18,67	136,82	0,9	55,44	0	0,85	116,30	97,63
Mai	35,22	24,65	171,96	1,2	73,92	0	1,15	197,75	173,10
Juin	19,06	13,34	203,05	1,2	73,92	0	0,85	172,59	159,25
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.14 : Calcul des besoins en eau pour la courgette.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03	0,5	30,8	0	0,4	64,81	44,58
Oct	22,02	15,41	106,45	0,5	30,8	0	0,5	53,23	37,81
Nov	27,14	19,00	66,8	0,5	30,8	0	0,8	53,44	34,44
Dec	25,87	18,11	48,83	0,5	30,8	0	0,95	46,39	28,28
Jan	30,72	21,50	45,66	0,5	30,8	0	0,6	27,40	5,89
Fev	23,24	16,27	58,63						
Mars	33,15	23,21	91,33						
Avr	26,67	18,67	136,82						
Mai	35,22	24,65	171,96						
Juin	19,06	13,34	203,05						
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.15 : Calcul des besoins en eau pour l'oignon.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45	0,2	12,32	0	0,4	42,58	27,17
Nov	27,14	19,00	66,8	0,4	24,64	0	0,75	50,10	31,10
Dec	25,87	18,11	48,83	0,4	24,64	0	0,95	46,39	28,28
Jan	30,72	21,50	45,66	0,4	24,64	0	0,9	41,09	19,59
Fev	23,24	16,27	58,63	0,4	24,64	0	0,7	41,04	24,77
Mars	33,15	23,21	91,33						
Avr	26,67	18,67	136,82						
Mai	35,22	24,65	171,96						
Juin	19,06	13,34	203,05						
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.16 : Calcul des besoins en eau pour l'Ail.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45	0,2	12,32	0	0,5	53,23	37,81
Nov	27,14	19,00	66,8	0,2	12,32	0	0,75	50,10	31,10
Dec	25,87	18,11	48,83	0,4	24,64	0	0,85	41,51	23,40
Jan	30,72	21,50	45,66	0,4	24,64	0	0,9	41,09	19,59
Fev	23,24	16,27	58,63	0,4	24,64	0	0,7	41,04	24,77
Mars	33,15	23,21	91,33	0,4	24,64	0	0,55	50,23	27,03
Avr	26,67	18,67	136,82						
Mai	35,22	24,65	171,96						
Juin	19,06	13,34	203,05						
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.17 : Calcul des besoins en eau pour l'haricot.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03	0,7	43,12	0	0,85	137,73	117,50
Oct	22,02	15,41	106,45						
Nov	27,14	19,00	66,8						
Dec	25,87	18,11	48,83						
Jan	30,72	21,50	45,66						
Fev	23,24	16,27	58,63						
Mars	33,15	23,21	91,33						
Avr	26,67	18,67	136,82						
Mai	35,22	24,65	171,96						
Juin	19,06	13,34	203,05	0,5	30,8	0	0,5	101,53	88,18
Juill	11,13	7,79	228,74	0,5	30,8	0	0,65	148,68	140,89
Aout	29,16	20,41	220,03	0,7	43,12	0	1,1	242,03	221,62

III.5.3. Estimation des besoins en eau des arboricultures :

Tableau III.18 : Calcul des besoins en eau pour la vigne.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03	1,5	92,4	0	0,4	64,81	44,58
Oct	22,02	15,41	106,45	1,5	92,4	0	0,4	42,58	27,17
Nov	27,14	19,00	66,8	1,5	92,4	0	0	0,00	0
Dec	25,87	18,11	48,83	1,5	92,4	0	0	0,00	0
Jan	30,72	21,50	45,66	1,5	92,4	0	0	0,00	0
Fev	23,24	16,27	58,63	1,5	92,4	0	0	0,00	0
Mars	33,15	23,21	91,33	1,5	92,4	0	0,15	13,70	0
Avr	26,67	18,67	136,82	1,5	92,4	0	0,45	61,57	42,90
Mai	35,22	24,65	171,96	1,5	92,4	0	0,6	103,18	78,52
Juin	19,06	13,34	203,05	1,5	92,4	0	0,7	142,14	128,79
Juill	11,13	7,79	228,74	1,5	92,4	0	0,7	160,12	152,33
Aout	29,16	20,41	220,03	1,5	92,4	0	0,45	99,01	78,60

Tableau III.19 : Calcul des besoins en eau pour l'olivier.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03	1,5	92,4	0	0,75	121,52	101,29
Oct	22,02	15,41	106,45	1,5	92,4	0	0,75	79,84	64,42
Nov	27,14	19,00	66,8	1,5	92,4	0	0,75	50,10	31,10
Dec	25,87	18,11	48,83	1,5	92,4	0	0,65	31,74	13,63
Jan	30,72	21,50	45,66	1,5	92,4	0	0,65	29,68	8,18
Fev	23,24	16,27	58,63	1,5	92,4	0	0,65	38,11	21,84
Mars	33,15	23,21	91,33	1,5	92,4	0	0,65	59,36	36,16
Avr	26,67	18,67	136,82	1,5	92,4	0	0,65	88,93	70,26
Mai	35,22	24,65	171,96	1,5	92,4	0	0,75	128,97	104,32
Juin	19,06	13,34	203,05	1,5	92,4	0	0,85	172,59	159,25
Juill	11,13	7,79	228,74	1,5	92,4	0	0,85	194,43	186,64
Aout	29,16	20,41	220,03	1,5	92,4	0	0,85	187,03	166,61

III.5.4. Estimation des besoins en eau des Fourragères :

Tableau III.20: Calcul des besoins en eau pour Le Sorgho

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45						
Nov	27,14	19,00	66,8						
Dec	25,87	18,11	48,83						
Jan	30,72	21,50	45,66						
Fev	23,24	16,27	58,63						
Mars	33,15	23,21	91,33	0,3	18,48	0	0,4	36,53	13,33
Avr	26,67	18,67	136,82	0,8	49,28	0	0,6	82,09	63,42
Mai	35,22	24,65	171,96	1,2	73,92	0	0,8	137,57	112,91
Juin	19,06	13,34	203,05	1,2	73,92	0	0,6	121,83	108,49
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

Tableau III.21: Calcul des besoins en eau pour l'Avoine

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	Bnet (mm)
Sep	28,9	20,23	162,03						
Oct	22,02	15,41	106,45	0,4	24,64	0	0,3	31,94	16,52
Nov	27,14	19,00	66,8	0,7	43,12	0	0,4	26,72	7,72
Dec	25,87	18,11	48,83	0,9	55,44	0	0,7	34,18	16,07

Jan	30,72	21,50	45,66	1	61,6	0	0,85	38,81	17,31
Fev	23,24	16,27	58,63	1,2	73,92	0	0,95	55,70	39,43
Mars	33,15	23,21	91,33	1,2	73,92	0	1,05	95,90	72,69
Avr	26,67	18,67	136,82	1,2	73,92	0	1	136,82	118,15
Mai	35,22	24,65	171,96	1,2	73,92	0	0,8	137,57	112,91
Juin	19,06	13,34	203,05	1,2	73,92	0	0,25	50,76	37,42
Juill	11,13	7,79	228,74						
Aout	29,16	20,41	220,03						

III.6.Calcul des besoins en eau pour les assolements 1 et 2 :

Tableau III.22: Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 1

Mois	Blé	Orge	Oignon	Ail	Pomme De terre (As)	Pomme De terre (S)	Tomate	Sorgho	Olivier	vigne	Totale
Sept					60,79				101,29	44,58	206,66
Oct	11,2		27,17	37,81	59,1				64,42	27,17	226,87
Nov	7,72	7,72	31,1	31,1	47,8			0	31,1	0	156,54
Déc	11,19	11,19	28,28	23,4	18,51			0	13,63	0	106,2
Jan	17,31	12,74	19,59	19,59				0	8,18	0	77,41
Fév	39,43	36,5	24,77	24,77		13,05		0	21,84	0	160,36
Mar	68,13	63,56		27,03		40,73	22,46	0	36,16	0	258,07
Avr	104,47	83,95				118,15	97,63		70,26	42,9	517,36
Mai	95,72	78,52				104,32	173,1	78,52	104,32	78,52	713,02
Jui	67,88	67,88					159,25	128,79	159,25	128,79	711,84
Juill								152,33	186,64	152,33	491,3
Août								78,6	166,61	78,6	323,81
Totale	423,05	362,06	130,91	163,7	186,2	276,25	452,44	438,24	963,7	552,89	3949,44

Tableau III.23: Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 2.

Mois	Orge en vert	Blé d'hiver	Tomate	Haricots	Courgette	Oignon	Vigne	Olivier	Avoine	total
Sept				117,5	44,58		44,58	101,29		307,95
Oct		11,2			37,81	27,17	27,17	64,42	16,52	184,29
Nov	1,04	7,72			34,44	31,1	0	31,1	7,72	113,12
Déc	1,42	16,07			28,28	28,28	0	13,63	16,07	103,75
Jan	10,46	17,31			5,89	19,59	0	8,18	17,31	78,74
Fév	33,57	39,43				24,77	0	21,84	39,43	159,04
Mar	63,56	68,13	22,46				0	36,16	72,69	263
Avr	83,95	97,63	97,63				42,9	70,26	118,15	510,52
Mai	69,92	95,72	173,1				78,52	104,32	112,91	634,49
Jui		57,73	159,25	88,18			128,79	159,25	37,42	630,62
Juill				140,89			152,33	186,64		479,86

Août				221,62			78,6	166,61		466,83
total	263,92	410,94	452,44	568,19	151	130,91	552,89	963,7	438,22	3932,21

III.6.1 Calcul du débit spécifique

Le débit spécifique se calcul par la formule suivantes :

$$Q_s = (B_{net}) / (N_j * N_i * 3600 * E_i) \dots\dots\dots \text{III.7}$$

Avec:

- ✓ B_{net} : besoin net du mois de pointe en mm/mois ;
- ✓ N_i : nombre des heures d'irrigation=24h ;
- ✓ N_j : nombre de jours du mois de pointe =30 jours ;
- ✓ E_i : Efficience d'irrigation que nous avons estimée à 75%.

On calcule les besoins en eau pour l'assolement le plus exigeant (Assolement 1 et 2)

D'où les besoins de pointe correspondent au mois de Mai :

$$B_{net} = 713,02 \text{ mm/mois.}$$

$$q_s = 3,7 \text{ l/s/ha} > 1.5 \text{ l/s/ha}$$

Le débit spécifique obtenu est supérieur à 1.5, il y'a un risque de surdimensionnement des conduites de refoulement ou gravitaire.

Pour y remédier, nous avons trois méthodes pour estimer le débit spécifique :

- prendre la moyenne des débits spécifiques de l'ensemble des cultures ;
- prendre en considération la moyenne des débits spécifiques des cultures les plus exigeantes ;
- On prend donc le débit spécifique de la culture la plus exigeante pour le mois de pointe

Dans notre cas, on prend le débit spécifique de la culture la plus exigeante :

Des Olivier, en mois de Juillet

$$B_{net} = 186,64 \text{ mm, donc le débit spécifique corrigé est de } Q_s = 0.96 \text{ l/s/ha.}$$

III.6.2 Evaluation du débit caractéristique :

Le calcul du débit caractéristique permet de définir

$$Q_{car} = q_s * S$$

q_s : débit spécifique de mois de pointe en (l/s/ha)

S : la superficie nette à irriguer = 400 ha

$$Q_{car} = q_s. S = 0.96 \times 400 = 384 \text{ l/s} = 0.384 \text{ m}^3/\text{s}$$

III.6.3. Estimation des volumes d'eau d'irrigation :

L'estimation des volumes d'eau d'irrigation permet de prévoir les volumes d'eau stockés dans la retenue et d'effectuer un meilleur calendrier d'arrosage.

$$\text{Le volume des besoins en eau} = \text{Besoins bruts de la culture (m}^3\text{)} * \text{la surface}$$

Le volume des besoins en eau pour notre périmètre est présenté dans le Tableau III-24.

Tableau III.24 : volume d'eau d'irrigation.

Type de culture	Surface (ha)	Besoins nets (mm)	Besoins bruts (m ³ /ha)	Besoins totaux (m ³)
Blé	30	423,05	5640,67	169220
Blé d'hiver	30	410,94	5479,2	164376
Orge grain	30	362,06	4827,47	144824
Orge en vert	30	263,92	3518,93	105568
P.Terre (AS)	22,8	186,2	2482,67	56604,8
P.Terre (S)	22,8	276,25	3683,33	83980
Tomate	22,8	452,44	6032,53	137541,76
Courgette	22,8	151	2013,33	45904
Oignon	22,8	130,91	1745,47	39796,64
Ail	22,8	163,7	2182,67	49764,8
Haricot	23,2	568,19	7575,87	175760,1067
Vigne	40	552,89	7371,867	294874,6667
Olivier	40	963,7	12849,3	513973,3333
Sorgho	20	438,24	5843,2	116864
Avoine	20	438,22	5842,93	116858,6667
	500 ha		Total	2215910,773

D'après le tableau III.23, les besoins en eau totaux du périmètre Achaacha sont de : 2216000 m³.

III.7. Conclusion :

L'étude des besoins en eau de notre périmètre a permis de quantifier précisément les volumes nécessaires pour une irrigation optimale, en tenant compte des paramètres climatiques, des caractéristiques du sol et des exigences hydriques des cultures selon un scénario d'occupation des sols adapté. Après avoir estimé l'évapotranspiration de référence, base du calcul des besoins en eau, nous avons déterminé les besoins spécifiques de chaque culture. Le volume total d'eau d'irrigation requis est ainsi estimé à environ 2216000 m³. Une gestion efficace de ces ressources est indispensable pour assurer la durabilité des systèmes d'irrigation, optimiser les rendements agricoles et éviter le gaspillage ou le 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 du périmètre d'El Mehmel assure le captage, le transport et la distribution de l'eau destinée à l'irrigation. Il joue un rôle essentiel dans l'organisation des arrosages durant les périodes d'étiage et constitue un appui déterminant au maintien de l'activité agricole dans cette zone caractérisée par une forte contrainte hydrique.

Ce chapitre expose les différentes composantes du système d'adduction, décrit son mode de fonctionnement et détaille les étapes du dimensionnement hydraulique

IV.2 Ressources en eau du périmètre

L'alimentation en eau du périmètre d'El Mehmel repose principalement sur des forages . L'eau extraite est d'abord stockée dans des réservoirs situés à l'entrée du périmètre, assurant ainsi une gestion optimale des ressources. À partir de ce réservoir, l'eau est acheminée par un système de pompage vers les parcelles agricoles à travers un réseau de conduites principales. Ces dernières alimentent un système de distribution ramifié, qui se prolonge jusqu'aux bornes d'arrosage installées directement sur les parcelles. Ce dispositif permet une irrigation efficace et adaptée aux besoins des cultures.

IV.3 Organisation du périmètre

Le périmètre d'El Mehmel s'étend sur une superficie totale de 400 hectares, répartis en 37 îlots dont les surfaces varient entre 2,54 et 19,12 hectares. Cette organisation en îlots optimise la structuration du réseau d'adduction, permettant une distribution hydraulique plus efficace et adaptée aux besoins d'irrigation Ilots et bornes d'irrigation :

Le périmètre irrigué est organisé en îlots, unités agricoles autonomes alimentées par un réseau d'irrigation dédié. L'implantation des bornes d'arrosage doit considérer plusieurs facteurs : taille des exploitations, topographie locale, contraintes techniques et aspects économiques. Cette approche permet d'adapter le réseau aux besoins tout en optimisant l'utilisation de l'eau

IV.4 Rôle et fonction de la borne d'irrigation :

La borne d'irrigation représente un élément clé du système de distribution hydraulique agricole. Positionnée à l'articulation entre le réseau principal et les parcelles cultivées, cette infrastructure permet de réguler et d'adapter précisément l'apport en eau pour chaque îlot en fonction de ses

spécificités culturelles et de ses besoins hydriques. Son rôle stratégique consiste à assurer une répartition optimale des ressources en eau tout en répondant aux exigences techniques et agronomiques de chaque unité de production .

IV.5 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 :

$$Q_b = q_s \times S$$

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

IV.5.1 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
A2	$Q < 11.11$ l/s	1 entrée Φ 80, Φ 100	2 sorties Φ 65
A4	$Q < 11.11$ l/s	2 entrées Φ 80, Φ 100	4 sorties Φ 65
B	$11.11 < Q < 22.22$ l/s	2 entrées Φ 80, Φ 100, Φ 125	2 sorties Φ 100
C	$Q > 80$ m ³ /h 33.33 l/s	2 entrées Φ 80, Φ 100, Φ 125	1 sorties Φ 150

Tableau IV.2 : Calcul des débits des ilots 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	9,31	8,9376	pehd	A2
I 2	B2	2	4,58	4,3968	pehd	A2
I 3	B3	4	18,8	18,048	pehd	B
I 4	B4	4	17,8	17,088	pehd	B
I 5	B5	2	3,4	3,264	pehd	A2
I 6	B6	4	14,92	14,3232	pehd	B
I 7	B7	4	17,2	16,512	pehd	B

I 8	B8	4	18,2	17,472	pehd	B
I 9	B9	4	13,251	12,72096	pehd	B
I 10	B10	2	8	7,68	pehd	A2
I 11	B11	4	13,41	12,8736	pehd	B
I 12	B12	4	12,39	11,8944	pehd	B
I 13	B13	2	10,35	9,936	pehd	A2
I 14	B14	2	8,7	8,352	pehd	A2
I 15	B15	2	9,64	9,2544	pehd	A2
I 16	B16	4	13,22	12,6912	pehd	B
I 17	B17	2	7,87	7,5552	pehd	A2
I 18	B18	2	2,54	2,4384	pehd	A2
I 19	B19	2	5,329	5,11584	pehd	A2
I 20	B20	2	5,17	4,9632	pehd	A2
I 21	B21	2	5,2	4,992	pehd	A2
I 22	B22	2	8,17	7,8432	pehd	A2
I 23	B23	2	3,52	3,3792	pehd	A2
I 24	B24	4	13,18	12,6528	pehd	B
I 25	B25	4	15,9	15,264	pehd	B
I 26	B26	2	5,93	5,6928	pehd	A2
I 27	B27	2	4,31	4,1376	pehd	A2
I 28	B28	2	4,22	4,0512	pehd	A2
I 29	B29	2	5,24	5,0304	pehd	A2
I 30	B30	2	5,75	5,52	pehd	A2
I 31	B31	4	12,53	12,0288	pehd	B
I 32	B32	4	16,65	15,984	pehd	B
I 33	B33	4	13,6	13,056	pehd	B
I 34	B34	4	15,69	15,0624	pehd	B
I 35	B35	4	19,01	18,2496	pehd	B
I 36	B36	4	17,87	17,1552	pehd	B
I 37	B37	4	19,12	18,3552	pehd	B

IV.6 Etude du système de pompage

Un système de pompage doit être installé afin d'assurer la mise en charge du réseau à partir du réservoir . 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.6.1 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.

IV.6.1.1 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.

IV.6.2 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 :

$$HMT = (H_a + H_{ref}) + J + P_r + P_{NS} \dots \dots \dots (IV.1)$$

IV.6.2.1 Calcul de la hauteur géométrique H_g :

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

$$H_g = H_b - H_r \dots \dots \dots (IV.2)$$

- H_b : Altitude de la borne défavorable ,
- H_r : Altitude du réservoir ,

- $H_g = 1099,43 - 1102,17 = -2,74 \text{ m}$

IV.6.2.2 Calcul des pertes de charge totales

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

$$\Delta H_L = J = \left(\frac{3.592}{C_{HW}} \right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}} * Q^{1.852} \dots\dots\dots (IV.3)$$

IV.6.2.3 Calcul des pertes de charge singulière

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

$$\Delta H_s = 0.1 \times \Delta H_L \dots\dots\dots (IV.4)$$

IV.6.3 Calcul du débit de refoulement

Le débit total à refouler est déterminé comme suit :

$$Q_{forcé} = 1,05 \times Q_c \dots\dots\dots (IV.5)$$

$$Q_{c1} = Q_s \times ST = 0,96 \times 320 = 307,2 \text{ l/s} = 0,3072 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{c2} = 0,96 \times 80 = 76,8 \text{ l/s} = 0,0768 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Donc : } Q_{forcé1} = 1,05 \times 0,3072 = 0,32256 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$Q_{forcé2} = 1,05 \times 0,0768 = 0,08064 \text{ m}^3/\text{s}.$$

IV.6.4 Calcul du diamètre approximatif

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

$$D = \sqrt[3]{Q_{ref}} \dots\dots\dots (IV.6)$$

$$D_1 = \sqrt[3]{0,32256} = 0,568 \text{ m} = 568 \text{ mm}$$

IV.6.5 Calcul du débit 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	4,57	2134	119,96	12,00	131,95	154,81
400	2,57	2134	29,55	2,96	32,51	55,37
500	1,64	2134	9,97	1,00	10,97	33,83
600	1,14	2134	4,10	0,41	4,51	27,37
700	0,84	2134	1,94	0,19	2,13	24,99

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.6.6 Calcul des frais d'investissement

La formule des frais d'investissement est la suivante :

$$F_{Am} = A \times Pr_t \dots \dots \dots (IV.7)$$

Où :

$$A = \frac{i}{(i+1)^n - 1} + i \dots \dots \dots (IV.8)$$

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	2134	17072000	0,088	1502336
400	650	8490	2134	19504760	0,088	1716418,88
500	890	10800	2134	24946460	0,088	2195288,48
600	950	13000	2134	29769300	0,088	2619698,4
700	1100	15900	2134	36278000	0,088	3192464

IV.6.7 Calcul des frais d'exploitation

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

$$F_{exp} = e \times E \dots \dots \dots (IV.9)$$

Avec :

- **F_{exp}** : 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.6.8 Calcul de la puissance absorbée par la pompe

La puissance absorbée est déterminée selon la formule :

$$P_u = \frac{\rho \times g \times Q \times HMT}{\eta} \dots \dots \dots (IV.10)$$

Avec :

IV.6.9 Calcul de l'énergie consommée

L'énergie annuelle consommée par la station est :

$$E = P \times t \times 365 \dots \dots \dots (IV.11)$$

Les Tableaux **IV.7** et **IV.8** présentent 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)	F _{exp} (DA)
300	154,81	653,16	5483288,26	25606956,19
400	55,37	233,59	1961014,71	9157938,70
500	33,83	142,71	1198055,91	5594921,08
600	27,37	115,49	969505,06	4527588,64
700	24,99	105,43	885123,88	4133528,54

IV.6.10 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.9 et Tableau IV.10 présentent les calcul détaillé du bilan total des frais pour chaque diamètre considéré.

Tableau IV.6 : Bilan total des frais

Diamètre (mm)	Fexp (DA)	Finv (DA)	Bilan (Da)
300	25606956,19	1502336,00	27109292,19
400	9157938,70	1716418,88	10874357,58
500	5594921,08	2195288,48	7790209,56
600	4527588,64	2619698,40	7147287,04
700	4133528,54	3192464,00	7325992,54

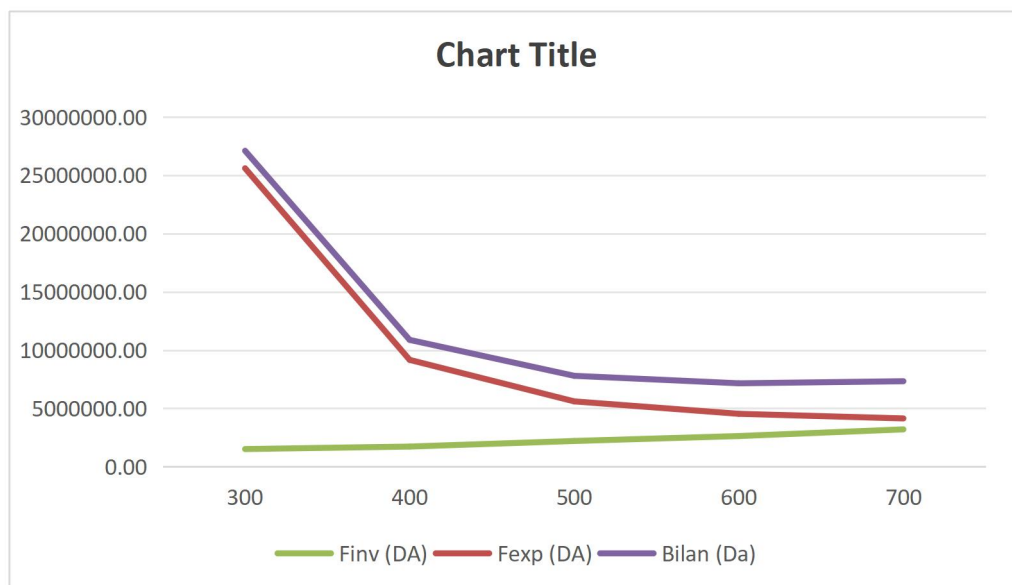


Figure IV.1. Bilan économique total en fonction des diamètres étudiés

D'après l'étude technico-économique, le diamètre de la conduite de refoulement est de 600 mm, correspondant à un débit de 0,32256m³/s et une hauteur manométrique totale (HMT) de 27,37 m

IV.6.11 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)_r minimal,
- Puissance absorbée minimale.

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 les tableau IV.11 et tableau IV.12

Tableau IV.7 : Résultats de Sélection nombre de Pompes – Logiciel Caprari-1-

Nombre de pompe	Q (l/s)	HMT (m)	Q _p (l/s)	η (%)	N (tr/mn)	P _{ab} (kw)	NPSH _r (m)	Ø mm
1	322,56	-	-	-	-	-	-	-
2	161,28	-	-	-	-	-	-	-
3	107,52	27,3	108	64,9	2950	46	5,63	125
4	80,64	28,5	82,2	74,6	1450	31,3	4,6	125
5	64,512	28,4	65,7	77,5	1450	24	3,22	125
6	53,76	28,1	54,4	77,2	1450	19,8	2,74	125

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

- 4 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 :

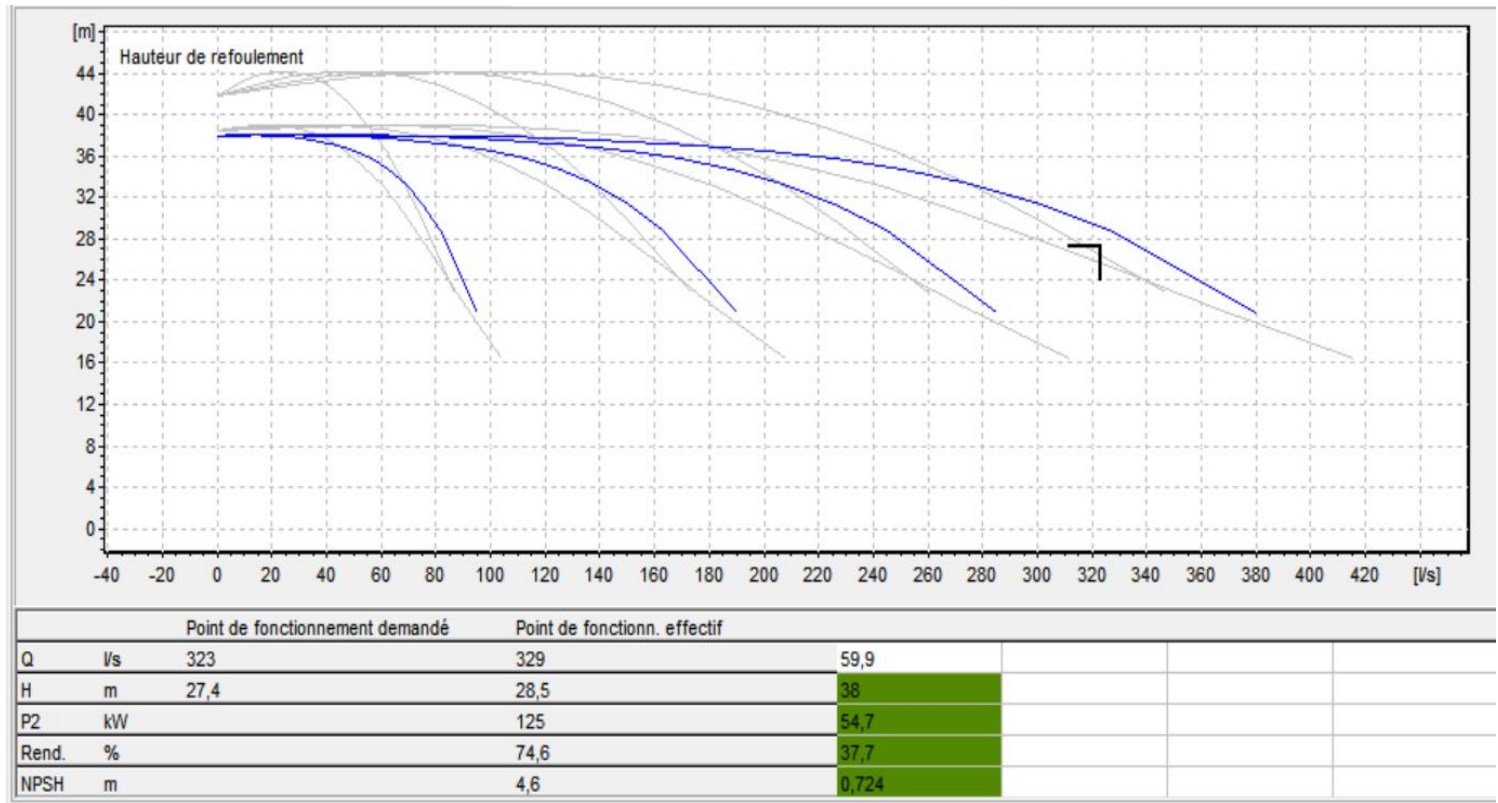


Figure IV.2: Courbe caractéristique de la pompe

IV.6.11.1 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:

$$(NPSH)_d > (NPSH)_r$$

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.

$$(NPSH)_d = \frac{P_{at}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - \left(h_a + \frac{v_{asp}^2}{2g} + \Delta H_{asp} \right) \dots \dots \dots (IV.12)$$

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, $\frac{P_v}{\rho g} = 0.24 \text{ m}$,
- ΔH_{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} :**

$$Q = \frac{Q_r}{4} = 80,64 \text{ l/s} \dots\dots\dots(\text{IV.13})$$

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

$$V_{asp} = \frac{Q}{S} = \frac{0,08064}{0,049} = 1,64 \text{ m/s} \dots\dots\dots(\text{IV.14})$$

Donc :

$$\frac{v^2}{2g} = 0,137$$

❖ **Calcul de ΔH_{asp} :**

On prend 4m/1000m de linéaire, donc :

$$\Delta H_{asp} = \frac{4 \times 4}{1000} = 0,016 \text{ m}$$

$$\text{Donc : } NPSH_d = 10.33 - 0.24 - 0,137 - 0.016 = 7,937 \text{ m}$$

$$(NPSH)_r = 4,6 + r = 4,6 + 0.4 = 5, \text{ (r : marge de sécurité varie entre 0.3-0.5)}$$

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

IV.8 Dimensionnement du Réservoir de stockage

Etant donné la superficie importante, on opte pour un réservoir circulaire.

Le volume du réservoir est estimé comme suit :

$$V = Q_C \times T_{nf} \dots\dots\dots(\text{IV.15})$$

Avec :

- **V** : volume d'eau d'irrigation (m^3),
- **Qc** : débit caractéristique (m^3/h),
- **Tnf** : temps de non-fonctionnement, pris égal à 1 heure.

$$Q_{C1} = 307,2 \text{ l/s} = 1061,68 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_1 = 1061,68 \times 1 = 1061,68 \text{ m}^3$$

On prend : $V_1 = 1000 \text{ m}^3$.

❖ Les dimensions du réservoir :

Les dimensions finales du réservoir cylindriques sont :

Réservoir

- Diamètre : 16m
- Hauteur : 5 m.

IV.7 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.7.1 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.

IV.7.1.1 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.

IV.7.1.2 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.

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.7.2 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.

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V_{adm}}} \dots \dots \dots (IV.16)$$

Avec

- **D** : Diamètre intérieur de la conduite (en mm),
- **Q** : Débit d'eau circulant (en m³/s),
- **V_{adm}** : Vitesse admissible dans la conduite (en m/s).

IV.7.3 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.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \dots \dots \dots (IV.17)$$

- **Z₁ et Z₂** : 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,
- **ΔH** : 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 :

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

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau IV.9

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

N° du tronçon	Langueur tronçon (m)	Débit (l/s)	D calculé (mm)	Diamètre Normal (mm)	Dint (mm)	Mat	V (m/s)	Pcharge Lin (m)	Pcharge total (m)	C terrain aval Z (m)	Cote Piezo (m)	Pression (m)	Pression (bars)
R-ST	531,45	322,56	523,39	560	493,6	Fonte	1,69	1,43	1,57	1093,06	1129,10	36,04	3,60
ST-N1	184,9	185,44	396,85	400	352,6	Fonte	1,90	0,92	1,01	1092,09	1128,09	36,00	3,60
N1-B7	31,5	16,50	118,38	125	110,2	PEHD	1,73	0,51	0,56	1092,92	1127,52	34,60	3,46
N1-N2	177,5	168,94	378,78	400	352,6	Fonte	1,73	0,74	0,82	1090,51	1127,27	36,76	3,68
N2-B16	18,22	12,69	103,82	110	96,8	PEHD	1,73	0,34	0,37	1090,31	1126,90	36,59	3,66
N2-N3	27,98	156,25	364,27	400	352,6	Fonte	1,60	0,10	0,11	1090,24	1127,16	36,92	3,69
N3-N4	578	65,45	235,75	250	220,4	PEHD	1,72	4,12	4,53	1096,19	1122,63	26,44	2,64
N4-B6	21,84	14,32	110,29	125	110,2	PEHD	1,50	0,27	0,30	1095,24	1122,33	27,09	2,71
N4-N5	252,36	51,13	208,38	250	220,4	PEHD	1,66	1,90	2,09	1095,17	1120,54	25,37	2,54
N5-N6	366,8	3,26	52,65	75	66,0	PEHD	0,95	3,56	3,92	1099,23	1116,62	17,39	1,74
N6-B5	15	3,26	52,65	75	66,0	PEHD	0,95	0,15	0,16	1099,43	1116,46	17,03	1,70
N4-N7	179	47,87	201,62	250	220,4	PEHD	1,55	1,19	1,31	1094,14	1111,91	17,77	1,78
N7-B4	21,36	17,09	120,47	125	110,2	PEHD	1,79	0,37	0,41	1092,92	1111,50	18,58	1,86
N7-B9	16,7	12,72	103,94	110	96,8	PEHD	1,73	0,31	0,34	1093,50	1112,38	18,88	1,89
N7-N8	322,65	18,05	123,81	125	110,2	PEHD	1,89	6,18	6,80	1089,57	1105,11	15,54	1,55
N8-B3	39,45	18,05	123,80	125	110,2	PEHD	1,89	0,76	0,83	1090,32	1104,28	13,96	1,40
N3-N9	153,37	90,80	277,70	315	277,6	PEHD	1,90	1,15	1,27	1089,32	1125,89	36,57	3,66
N9-B8	18,78	17,47	121,81	125	110,2	PEHD	1,83	0,34	0,37	1089,40	1125,52	36,12	3,61
N9-N10	271,44	73,33	249,55	250	220,4	PEHD	1,92	2,39	2,62	1087,51	1123,27	35,76	3,58
N10-B10	15	7,68	80,76	90	79,2	PEHD	1,56	0,29	0,32	1086,80	1122,95	36,15	3,61
N10-B15	20	9,25	88,65	90	79,2	PEHD	1,88	0,55	0,61	1087,49	1122,66	35,17	3,52

N10-N11	120,7	56,40	218,85	250	220,4	PEHD	1,83	1,09	1,20	1086,37	1122,07	35,70	3,57
N11-N12	645	13,33	106,42	125	96,8	PEHD	1,81	7,06	7,76	1093,83	1114,31	20,48	2,05
N12-B2	15	4,40	61,11	75	66,0	PEHD	1,29	0,25	0,28	1094,30	1114,03	19,73	1,97
N12-N13	67,95	8,94	87,12	90	79,2	PEHD	1,82	1,75	1,93	1093,40	1112,38	18,98	1,90
N13-B1	15	8,94	87,12	90	79,2	PEHD	1,82	0,39	0,43	1093,23	1111,95	18,72	1,87
N11-N14	123,94	43,06	191,24	200	176,2	PEHD	1,77	1,21	1,33	1086,27	1120,74	34,47	3,45
N14-B11	15	12,87	104,56	110	96,8	PEHD	1,75	0,29	0,32	1084,86	1120,42	35,56	3,56
N14-B14	19,68	8,35	84,22	90	79,2	PEHD	1,70	0,45	0,49	1086,13	1120,25	34,12	3,41
N14-N15	115,97	21,83	136,16	160	141,0	PEHD	1,40	0,95	1,04	1085,53	1119,70	34,17	3,42
N15-B12	13,66	11,89	100,51	110	96,8	PEHD	1,62	0,23	0,25	1085,17	1119,45	34,28	3,43
N15-B13	18,86	9,94	91,86	110	96,8	PEHD	1,35	0,22	0,25	1085,35	1119,45	34,10	3,41
ST-N16	569,4	116,65	314,75	315	277,6	PEHD	1,93	3,84	4,22	1089,24	1124,88	35,64	3,56
N16-B17	15	7,56	80,10	90	79,2	PEHD	1,53	0,28	0,31	1089,13	1124,57	35,44	3,54
N16-N17	139,8	109,09	304,38	315	277,6	PEHD	1,80	0,83	0,92	1088,24	1123,65	35,41	3,54
N17-N18	214,84	18,74	126,15	160	141,0	PEHD	1,20	1,33	1,46	1086,88	1122,19	35,31	3,53
N18-B27	11,88	4,14	59,28	75	66,0	PEHD	1,21	0,18	0,20	1086,70	1123,45	36,75	3,68
N18-B28	20	4,05	58,66	75	66,0	PEHD	1,18	0,29	0,32	1086,60	1122,07	35,47	3,55
N18-N19	272,41	10,55	94,66	110	96,8	PEHD	1,43	3,60	3,96	1087,41	1118,23	30,82	3,08
N19-B29	48	5,03	65,36	75	66,0	PEHD	1,47	1,04	1,14	1087,37	1117,09	29,72	2,97
N19-B30	12,9	5,52	68,47	75	66,0	PEHD	1,61	0,33	0,36	1086,90	1116,77	29,87	2,99
N17-N20	139,21	90,35	277,01	315	277,6	PEHD	1,89	1,04	1,14	1087,63	1122,51	34,88	3,49
N20-N21	376	12,03	101,07	110	96,8	PEHD	1,64	6,33	6,97	1086,80	1115,54	28,74	2,87
N21-B31	31,6	12,03	101,07	110	96,8	PEHD	1,64	0,53	0,59	1085,85	1114,96	29,11	2,91
N20-N22	24,76	78,33	257,91	315	277,6	PEHD	1,64	0,14	0,16	1087,10	1122,35	35,25	3,53
N22-B18	15	2,44	45,51	50	44,0	PEHD	1,60	0,61	0,67	1086,65	1121,68	35,03	3,50

N22-N23	113,31	75,89	253,87	315	277,6	PEHD	1,59	0,61	0,67	1086,10	1121,68	35,58	3,56
N23-B26	20	5,69	69,53	75	66,0	PEHD	1,66	0,54	0,60	1086,23	1121,08	34,85	3,49
N23-N24	84,7	70,19	244,16	250	220,4	PEHD	1,84	0,69	0,76	1085,70	1120,92	35,22	3,52
N24-B19	15	5,12	65,91	75	66,0	PEHD	1,50	0,33	0,37	1084,98	1120,55	35,57	3,56
N24-N25	55,24	65,08	235,09	250	220,4	PEHD	1,71	0,39	0,43	1085,32	1120,49	35,17	3,52
N25-B25	18,06	15,26	113,86	125	110,2	PEHD	1,60	0,25	0,28	1085,23	1120,21	34,98	3,50
N25-N26	35,46	49,81	205,68	225	198,2	PEHD	1,62	0,25	0,28	1084,85	1120,21	35,36	3,54
N26-B24	16,17	12,65	103,66	110	96,8	PEHD	1,72	0,30	0,33	1084,68	1119,88	35,20	3,52
N26-N27	136,31	37,16	177,65	200	176,2	PEHD	1,52	1,01	1,11	1084,18	1119,10	34,92	3,49
N27-B20	15	4,96	64,92	75	66,0	PEHD	1,45	0,32	0,35	1083,93	1118,75	34,82	3,48
N27-B23	16,37	3,38	53,57	75	66,0	PEHD	0,99	0,17	0,19	1083,98	1118,91	34,93	3,49
N27-N28	221	28,82	156,44	160	141,0	PEHD	1,85	3,03	3,33	1082,80	1115,77	32,97	3,30
N28-B21	25,62	4,99	65,11	75	66,0	PEHD	1,46	0,55	0,60	1082,73	1115,17	32,44	3,24
N28-B22	31,9	7,84	81,61	90	79,2	PEHD	1,59	0,65	0,71	1082,65	1115,06	32,41	3,24
N28-N29	582	15,98	116,51	140	123,4	PEHD	1,34	5,13	5,64	1079,44	1110,13	30,69	3,07
N29-B32	123,8	15,98	116,51	125	110,2	PEHD	1,68	1,89	2,08	1079,41	1108,05	28,64	2,86
R2-ST2	1110	81,88	263,70	315	277,6	PEHD	1,71	6,89	7,58	1088,96	1103,70	14,74	1,47
ST2-N30	857	81,88	263,70	315	277,6	PEHD	1,71	5,32	5,85	1082,01	1097,85	15,84	1,58
N30-B37	41	18,36	124,85	125	110,2	PEHD	1,93	0,81	0,89	1082,00	1096,95	14,95	1,50
N30-N31	410	63,52	232,27	250	220,4	PEHD	1,67	2,76	3,04	1079,35	1094,81	15,46	1,55
N31-B36	71	17,16	120,70	125	110,2	PEHD	1,80	1,24	1,36	1079,96	1093,45	13,49	1,35
N31-N32	355,5	46,37	198,44	250	220,4	PEHD	1,50	2,23	2,46	1077,24	1092,35	15,11	1,51
N32-B35	46,9	18,25	124,49	125	110,2	PEHD	1,91	0,92	1,01	1077,13	1091,34	14,21	1,42
N32-N33	149	28,12	154,53	160	141,0	PEHD	1,80	1,95	2,15	1076,04	1090,20	14,16	1,42
N33-B34	63,9	15,06	113,10	125	110,2	PEHD	1,58	0,88	0,96	1075,96	1089,24	13,28	1,33

N33-N34	256	13,06	105,30	125	110,2	PEHD	1,37	2,69	2,96	1074,05	1087,24	13,19	1,32
N34-B33	69,8	13,06	105,30	110	96,8	PEHD	1,77	1,37	1,51	1073,83	1085,73	11,90	1,19

Selon le tableau IV.9, les pressions relevées se situent entre **1,4 et 3,69 bars**, . Ces valeurs restent globalement satisfaisantes et permettent d'assurer une irrigation adéquate

VI.6. Conclusion

La conception du réseau d'adduction et de distribution constitue une étape essentielle dans tout projet d'aménagement hydro-agricole, car elle assure une organisation optimale du périmètre.

Pour le système de refoulement envisagé, le diamètre optimal de la conduite principale a été déterminé à **600 mm**, sur la base d'une analyse technico-économique approfondie, visant à concilier les coûts d'investissement et d'exploitation.

L'ensemble du dispositif, depuis le réservoir de stockage jusqu'aux bornes d'irrigation, a été dimensionné de manière à garantir une gestion rationnelle et durable de la ressource en eau, facteur déterminant pour le développement agricole de la région.

En ce qui concerne le réseau de distribution, les résultats indiquent que la pression aux bornes varie entre **1,4 et 3,69 bars**, valeurs conformes aux normes requises pour assurer une irrigation uniforme et performante.

Chapitre V

Choix de la technique d'irrigation

Chapitre V : Choix de la technique d'irrigation

V.1 Introduction

L'irrigation est essentielle pour pallier les insuffisances de la pluviométrie et assurer une croissance optimale des cultures. Diverses méthodes, adaptées selon le type de sol, de culture et les ressources disponibles, permettent de gérer efficacement l'apport en eau tout en limitant les pertes.

V.2 Sélection des méthodes d'irrigation :

La sélection d'une méthode d'irrigation dépend de nombreux critères techniques et socio-économiques qui conditionnent sa performance et sa rentabilité. Parmi les paramètres à considérer figurent :

- La nature de la culture à irriguer,
- Les caractéristiques du sol et la configuration du terrain,
- Le budget à consacrer à l'installation,
- La disponibilité et le coût de la main-d'œuvre.

V.3 Catégories des systèmes d'irrigation

On distingue principalement trois grandes familles de techniques d'irrigation :

- L'irrigation de surface ou gravitaire,
- L'irrigation localisée (goutte à goutte),
- L'irrigation par aspersion.

V.3.1 Irrigation gravitaire et ses techniques:

L'irrigation gravitaire utilise la force de la gravité pour distribuer l'eau directement à la surface du sol, sans besoin d'énergie mécanique. Elle regroupe plusieurs méthodes :

V.3.1.1 Irrigation par ruissellement : l'eau est déversée en amont pour ruisseler sur la parcelle. Cette technique est simple mais peu économique en eau, avec d'importantes pertes par écoulement.

V.3.1.2 Irrigation à la raie (ou par sillons) : l'eau est dirigée dans des petits sillons creusés entre les rangées de culture, favorisant une infiltration ciblée près des racines.



Figure V.1: Irrigation à la raie

V.3.1.3 Irrigation par submersion (ou par bassins) : le terrain est inondé sur une certaine période, utilisée surtout pour des cultures comme le riz qui tolèrent cet environnement.



Figure V.2 : Irrigation par submersion

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

❖ **Avantages :**

- Méthode simple qui ne requiert aucune source d'énergie externe,
- Coût d'investissement réduit,
- Favorise la réalimentation des nappes phréatiques,
- Permet l'irrigation de grandes superficies

❖ **Inconvénients :**

- Préparation préalable du terrain indispensable,
- Pertes d'eau importantes entraînant une faible efficacité,
- Travaux de terrassement et de nivellement requis,
- Temps d'arrosage excessivement long,
- Besoin en main-d'œuvre très élevé.

V.3.2 Irrigation localisée (goutte à goutte) :

L'irrigation goutte à goutte consiste à acheminer l'eau sous pression à travers un réseau de canalisations, le plus souvent en PEHD. Celle-ci est ensuite délivrée sous forme de gouttes au niveau du champ grâce à des goutteurs disposés le long des rangées de plantation. L'humidification du sol se limite ainsi à la zone située directement autour des racines des plantes.



Figure V.3 : Irrigation localisée

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

❖ Avantages

- Optimisation de l'utilisation de l'eau,
- Application précise et ciblée de l'irrigation,
- Réduction des besoins en main-d'œuvre,
- Compatible avec divers types de sols.

❖ Inconvénients :

- Coût initial d'investissement relativement élevé,
- Forte sensibilité à la qualité de l'eau,
- Exige une certaine expertise technique,
- Moins approprié pour l'irrigation de très grandes superficies

V.4 Irrigation par aspersion :

Ce système assure l'arrosage des plantes au moyen d'une pluie artificielle : l'eau, acheminée sous pression par des canalisations, est projetée sur la parcelle à l'aide d'asperseurs rotatifs appelés "sprinklers". Cette technique d'irrigation est adaptée à l'ensemble des cultures. Son principal atout réside dans sa grande polyvalence, puisqu'elle peut convenir à presque tous les types de sols et de culture

V.4.1 Installations mobiles :

- **Irrigation par enrouleur** : un canon d'arrosage est déplacé automatiquement le long d'une ligne à l'aide d'un tuyau flexible enroulé sur une bobine motorisée.
- **Irrigation par pivot central** : une structure métallique pivote autour d'un point fixe et arrose en cercle, ce qui la rend particulièrement adaptée aux grandes exploitations.
- **Rampes frontales** : proches du système à pivot, mais se déplacent en ligne droite, convenant ainsi aux parcelles de forme rectangulaire.



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 :

- Distribution uniforme de l'eau avec un dosage maîtrisé,
- Moins de risques d'érosion par rapport à l'irrigation gravitaire,
- Possibilité d'intégrer la fertigation (apport d'engrais via l'eau),
- Réduction des besoins en main-d'œuvre grâce à l'automatisation,

- Rendement hydrique élevé, pouvant atteindre 75 à 85 % dans les systèmes bien conçus.

❖ **Inconvénients :**

- Coût d'installation initial important,
- Pertes d'eau par évaporation, accentuées en cas de vent ou de fortes chaleurs,
- Entretien fréquent nécessaire, notamment au niveau des buses et des filtres

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

En milieu aride, la sélection des méthodes d'irrigation doit prendre en compte des contraintes particulières telles que la rareté des ressources en eau, une évaporation élevée et des conditions climatiques sévères. Pour garantir une utilisation optimale de l'eau, les techniques sont privilégiées selon le type de culture :

. L'irrigation par aspersion est particulièrement recommandée pour les cultures maraîchères et céréalières.

V.6 Conclusion :

Dans le cadre d'un aménagement hydro-agricole, le choix de la technique d'irrigation en milieu aride revêt une importance capitale afin d'assurer une utilisation optimale des ressources en eau.

À l'issue de l'analyse comparative des différentes méthodes d'irrigation, notre étude préconise la mise en place d'une combinaison de deux systèmes complémentaires, adaptée aux caractéristiques de la zone d'étude :

-L'irrigation goutte à goutte pour l'arboriculture.

-L'irrigation par aspersion pour les cultures céréalières et maraîchères.

Chapitre VI

Dimensionnement à la parcelle

Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle

VI.1 Introduction

Le dimensionnement des parcelles constitue une étape fondamentale dans la planification agricole, car il est directement lié au choix du système d'irrigation adopté. Cette démarche prend en considération les contraintes techniques, climatiques et topographiques propres à la zone étudiée, afin de définir les dimensions optimales des parcelles. L'analyse se focalise sur les méthodes permettant d'adapter ce dimensionnement aux systèmes d'irrigation les plus utilisés, en particulier l'aspersion et le goutte-à-goutte. L'objectif principal est de répondre aux besoins réels des cultures tout en garantissant une gestion rationnelle, efficace et durable de la ressource en eau.

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

VI.3 Données générales :

Le système d'irrigation goutte à goutte sera installé sur l'îlot n°2, alimenté par la borne B2, avec une pression disponible de 1,97 bars. Cette pression est largement suffisante pour assurer le bon fonctionnement du réseau. La superficie de l'exploitation est de 2 hectares regroupés en une seule parcelle. La forme régulière et rectangulaire de celle-ci facilite l'installation du système. La configuration adoptée garantit une distribution homogène de l'eau. L'ensemble assure une irrigation optimale et durable sur toute la surface cultivée.

❖ Culture : Tomate.

- Espacement entre plants sur la ligne : 0.8 m,
- Espacements entre ramps : 1.50 m,
- Besoins de pointe 173,1 mm (Mai).

❖ Caractéristique du gouteur

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

VI.3.1 Besoins d'irrigation des cultures en irrigation localisée :

VI.3.1.1 Influence du taux de couverture du sol :

L'irrigation localisée, principalement utilisée pour les vergers et les cultures en ligne, nécessite le calcul des besoins en eau à l'aide d'un coefficient de réduction **Kr**. En effet, l'eau n'est apportée que sur une portion limitée du sol, généralement autour des racines. Ainsi, l'évapotranspiration de référence (ETM) est corrigée par ce coefficient afin de tenir compte du taux de couverture végétale, estimé à 60 % pour les plantes adultes. L'estimation de **Kr** se fait à l'aide de formules spécifiques, adaptées aux conditions de culture et aux caractéristiques de la parcelle

- (Keller & Karmeli, 1974)

$$Kr = \frac{Cs}{0.85} \dots\dots\dots (VI.1)$$

- Decroix, CTGREF

$$Kr = 0.1 + Cs \dots\dots\dots (VI.2)$$

Avec :

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

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

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

On adopte **Kr = 0,7**, une valeur qui intègre une marge de sécurité suffisante pour éviter la sous-estimation des besoins hydriques. Ce choix garantit une irrigation efficace et adaptée aux exigences de la culture. Ainsi, l'apport en eau reste fiable et conforme aux besoins réels des plantes.

Donc :

$$B_{nets} = B_j * Kr \dots\dots\dots (IV.3)$$

$$B_{nets} = (173,1/30) * 0.7 = 4,053 \text{ mm/j.}$$

VI.3.1.2 Dose nette pratique:

Après l'évaluation des besoins journaliers en eau, on détermine la fraction du sol à humidifier dans la zone racinaire, ce qui permet de calculer la dose nette d'irrigation (RFU), exprimée en hauteur d'eau réellement disponible pour la plante P

$$D_{\text{nette}} = (H_{\text{cc}} - H_{\text{pf}}) * Y * Z * d_a * P \dots \dots \dots (IV.4)$$

Avec :

$$P\% = \frac{n.S_{\text{pd}}.Sh}{S_a.S_r} \dots \dots \dots (VI.5)$$

En appliquant ces données à l'équation, on aboutit à :

$$P\% = (1 \times 0,8 \times 0,5) / (1,5 \times 0,8) = 33\%.$$

$$RFU = (0.256 - 0.19) * 1200 * (2/3) * 1.4 = 73,93 \text{ mm}.$$

Donc, pour notre cas, nous allons prendre en considération les éléments suivants :

$$D_{\text{nette}} = 140 * 0.33 = 24,4 \text{ mm}.$$

VI.3.1.3 Fréquence des arrosages (Fr jours)

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

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

$$Tr = \frac{24,4}{4,053} = 6,019 \text{ jours}$$

On prend $Tr = 7$ jours.

VI.3.1.4 La dose brute réelle :

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

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

Où :

- **Eff** : représente l'efficacité du réseau d'irrigation (90 %),

- **Cu** : est le coefficient d'uniformité de l'arrosage (90 %).

$$\text{Dose brute} = \frac{B_{\text{nette}} \times \text{Tr}}{\text{Eff} \times \text{Cu}} = \frac{4,053 \times 7}{0,9 \times 0,9} = 52,54 \text{ mm}$$

VI.3.1.5 Durée de fonctionnement par d'arrosage:

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

- **Sr** : Écartement entre rangs des arbres ;
- **Sa** : espacement des arbres sur les rangs ;
- **n** : nombre du goutteur ;
- **Qg** : le débit du goutteur (2 l/h).

$$\theta = \frac{52,54 \times 1,5 \times 0,8}{1 \times 2} = 32 \text{ heures}$$

VI.4 Calculs hydrauliques :

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

VI.4.1 Variation maximale du débit selon la règle de Christiansen :

Dans un réseau de goutte-à-goutte, garantir une distribution homogène de l'eau nécessite que l'écart maximal de débit entre les goutteurs ne dépasse pas 10 %. Cette exigence s'appuie sur la loi de fonctionnement des goutteurs, exprimée par la relation suivante :

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

- **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) :

$$\Delta H_{\text{linéaire}} = 2 - 0.2 = 1.8 \text{ mCE}$$

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.4.2 Dimensionnement des canalisations du réseau :

Dans le cadre du dimensionnement des conduites du réseau d'irrigation, les choix suivants ont été retenus :

- Les rampes d'irrigation sont prévues en polyéthylène basse densité (PEBD).
- Les porte-rampes seront réalisés en polyéthylène haute densité (PEHD).

Les diamètres des différentes conduites sont ensuite calculés à l'aide des formules suivantes :

- **Pour la rampe :**

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

- **Pour le porte-rampe :**

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

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.4.2.1 Le nombre de plantes par rampe :

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

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

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

VI.4.3 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.

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

VI.4.3.1 Débit de la rampe :

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

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

- 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.4.3.2 Diamètre calculé de la rampe :

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

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

$$\varnothing_{r(cal)} = \left(\frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(r)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = \left(\frac{1.2 \times 2.75}{0.478 \times 200^{1.75} \times 80} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = 11,79 \text{ mm}$$

On normalise D = 16 mm.

VI.4.3.3 Nombre de rampes :

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

$$N_r = \frac{l_{pr}}{S_r}$$

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

VI.4.3.4 Débit de la porte rampe :

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

$$Q_{pr} = N_r * Q_r = 66 * 200 = 13200 \text{ l/h}$$

VI.4.3.5 Diamètre calculé de la porte rampe :

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

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

Avec :

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

$$\emptyset_{Pr(cal)} = \left(\frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(Pr)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = \left(\frac{0.6 \times 2.75}{0.478 \times 13200^{1.75} \times 100} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = 67 \text{ mm}$$

On normalise D = 75mm.

VI.4.4 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 :

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

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 _N (mm)	Q (l/s)	ΔH _L (m)
la rampe	80	16	0,06	0,66
la porte rampes	100	75	3,67	1,05
tete de secteir	10	90	3,67	0,04
total	/	/	/	1,76

Les pertes de charge totale sont de l'orde de 1.76m 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 :

Le réseau d'irrigation par aspersion est installé au niveau de la parcelle P1 (îlot 2), d'une superficie de 1 hectares. Cette parcelle est alimentée par la borne B2, pour laquelle la pression calculée est d'environ 3,02 bars.

VI.4.1 Données générales :

- Choix de la culture : blé
- Temps de travail : 20 heures par jour et 26 jours par mois,
- Superficie : 0,96 Ha
- Longueur : 120 m
- Largeur : 80 m
- Alimentation en eau : Borne N°18
- Pression disponible : 3,5bars
- Perméabilité de sol : 10 mm/h
- Besoins de pointes : 104,47 mm/mois pour le mois d'avril.

VI4.2 Calcul de la dose pratique :

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

$$D_p = (H_{cc} - H_{pf}) * Y * Z * d_a \dots \dots \dots (VI.15)$$

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 :

$$D_p = 37 \text{ mm}$$

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 10 mm/h.

En se référant à la fiche technique (Voir Annexe 2) 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:

$$L = 3 \times d^{0.5} \times H^{0.25} \dots\dots\dots (VI.16)$$

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 :

Étant donné que notre zone est exposée à des vents forts, il est essentiel d'adapter l'espacement entre les arroseurs afin d'assurer une répartition homogène de l'eau.

Conformément aux recommandations des normes américaines, il est conseillé 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 $L = 14,5$ m, on obtient :

- $E_l = 14.79$ m,
- $E_a = 8.7$ m.

On normalise : $E_l = 12$ m, $E_a = 12$ 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 hauteur d'eau appliquée par unité de surface, est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$P_{asp} = \frac{q_{asp}}{E_a \times E_l} \dots\dots\dots (VI.17)$$

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 :

$$q_{asp} = 0.95 \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \sqrt{2 \times g \times H} \dots\dots\dots (VI.18)$$

Donc : $q_{asp} = 1.14$ m³/h et $P_{asp} = 7.9$ mm/h

La pluviométrie de l'asperseur calculée P reste inférieure à la perméabilité du sol ($K = 15$ 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 :

$$Tr = \frac{\text{Dose nette} \times N_j}{B_{mp}} \dots\dots\dots (IV.19)$$

Avec :

- B_{mp} : le besoin en eau du mois de pointe pour le blé, soit 104.47 mm ;
- N_j : le nombre de jours disponibles pour l'irrigation dans le mois, soit 26 jours.

$$Tr = \frac{\text{Dose nette} \times N_j}{B_{mp}} = \frac{37 \times 26}{104,47} = 9,2$$

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 représente la quantité d'eau nécessaire à apporter à la parcelle en intégrant les pertes liées au réseau d'aspersion.

Elle est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$D_{brute} = \frac{D_r}{E_{ff}} = \frac{B_{mp}}{\text{Nombre d'irrigation par mois} \times E_{ff}} \dots\dots\dots (VI.20)$$

Avec :

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

$$D_{brute} = \frac{104,47}{3 \times 0,75} = 46,43 \text{ mm}$$

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 :

$$T = \frac{D_{brute}}{\text{pluviométrie}} \dots\dots\dots (VI.21)$$

Pour notre cas, nous allons prendre en considération les éléments suivants :

$$T = \frac{46,43}{7,9} = 5,87 \text{ heures}$$

On prend $T = 6$ 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:

$$Q_{eq} = \frac{S \times B_{mp} \times 10}{T \times n \times N_j \times E_{ff}} \dots\dots\dots (VI.22)$$

Avec :

- Q_{eq} : débit d'équipement (m^3/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%).

$$Q_{eq} = \frac{S \times B_{mp} \times 10}{T \times n \times N_j \times E_{ff}} = \frac{0,96 \times 104,47 \times 10}{6 \times 2 \times 26 \times 0,75} = 4,15 m^3/h$$

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

VI.4.7.1 Calcul de la longueur du la rampe :

Afin d'assurer une couverture uniforme de l'irrigation, les asperseurs sont positionnés à une distance équivalente à un demi-écartement ($E_a/2$) de chaque bord de la parcelle. Cette disposition permet d'éviter les zones non irriguées en dehors de la surface utile.

La formule appliquée est la suivante :

$$L_r = \text{Largeur du terrain} - \frac{E_a}{2} \dots\dots\dots (VI.23)$$

Avec :

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

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

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 :

$$N_{asp} = \frac{L_r}{E_a} \dots\dots\dots (VI.24)$$

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

$$N_{asp} = \frac{L_r}{E_a} = \frac{74}{12} = 6,16$$

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

VI.4.7.3 Débit de 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 :

$$Q_r = q_{asp} \times N_{asp} \dots\dots\dots (VI.25)$$

- Q_r : débit de la rampe (m³/h)
- q_{asp} : débit d'un seul asperseur (m³/h) donné par la fiche technique de l'asperseur de type Perrot
- N_{asp} : nombre d'asperseurs installés sur une rampe

$$Q_r = 1.14 \times 7 = 7,98 \text{ m}^3/\text{h}$$

Diamètre de la rampe :

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

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} \dots\dots\dots (VI.26)$$

Avec :

- D_r : diamètre intérieur de la conduite (m),
- Q_r : débit de la rampe (m³/s),
- V : vitesse admissible de l'eau dans la conduite (en m/s), ici choisie égale à 1.5 m/s.

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} = \sqrt{\frac{4 \times (\frac{7.98}{3600})}{\pi \times 1.5}} = 43.37 \text{ mm}$$

On normalise à $D_N = 50 \text{ mm}$.

VI.4.7.5 Calcul de la longueur du porte rampe :

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

$$L_{pr} = \text{Largeur du terrain} - \frac{E_r}{2} \dots\dots\dots (VI.27)$$

- L_{pr} : longueur de la porte rampe (m)
- E_r : écartement entre les rampes (m)

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

VI.4.7.6 Nombre d'asperseurs :

$$N_{asp} = \frac{L_{pr}}{E_r} \dots\dots\dots (VI.28)$$

- N_{asp} : nombre d'asperseurs,
- L_{pr} : longueur de la porte rampe (m),
- E_r : écartement entre les rampes (m)

$$N_{asp} = \frac{L_{pr}}{E_r} = \frac{114}{12} = 9,5$$

On prend $N_{asp} = 9$ asperseurs.

VI.4.7.7 Débit du porte rampe :

Nous travaillons avec une seule rampe

$$Q_{pr} = q_r \times N_r \dots\dots\dots (VI.29)$$

Q_{pr} : est le débit d'une rampe (en m^3/s),

N_r : est le nombre de rampes alimentées par le porte-rampe.

$$Q_{pr} = q_r \times N_r = 7,98 \times 1 = 7,98 \text{ m}^3/\text{h}$$

VI.4.7.8 Diamètre de la rampe :

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

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} \dots \dots \dots \text{(VI.30)}$$

Avec :

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

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} = \sqrt{\frac{4 \times (\frac{7,98}{3600})}{\pi \times 1.5}} = 43,37 \text{ mm}$$

On normalise à $D_N = 63 \text{ mm}$.

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 :

$$\Delta H_L = \left(\frac{3.592}{CH_W} \right)^{1.852} \times \frac{L}{D^{4.87}} \times Q^{1.852} \dots \dots \dots \text{(VI.31)}$$

- ΔH_L : Perte de charge en m.
- CH_W : Coefficient de Hazan-Williams = 130.
- L : Longueur de la conduite (m),
- D : Diamètre intérieur (m).
- Q : Le débit de ramp (m^3/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_N (mm)	D_{int} (mm)	Q (l/s)	ΔH_L (m)
----------	-------	---------------	-------------------	---------	------------------

la rampe	74	63	58	6,84	0,59
la porte rampes	114	75	69,2	6,84	0,39
Tete de secteur	10	75	83	6,84	0,03
Total	/	/	/	/	1,02

Les pertes de charge totale sont de l'ordre de 1.02 m donc inférieur à 4.5 m restent dans les limites admises par la règle de Christiansen.

VI.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs techniques d'irrigation adaptées aux caractéristiques spécifiques des cultures ont été étudiées, notamment l'irrigation gravitaire, localisée (goutte-à-goutte) et par aspersion. Le dimensionnement hydraulique a permis de définir les

caractéristiques essentielles telles que les débits, les diamètres des conduites et les durées d'arrosage optimales. Une attention particulière a été portée au calcul des paramètres hydrauliques afin d'assurer une distribution efficace et homogène de l'eau. Le choix judicieux des installations, en tenant compte des pressions de fonctionnement et des pluviométries, favorise une gestion durable des ressources en eau et contribue à l'augmentation des rendements agricoles dans la zone étudiée

Chapitre VII

Calcul technico-économique

Chapitre VII : Calcul technico-économique

VII Introduction :

Toute initiative d'aménagement hydro-agricole doit être précédée d'une estimation rigoureuse des coûts, afin d'en garantir la faisabilité et d'évaluer sa rentabilité à court et long terme.

Ce chapitre est consacré à l'estimation des dépenses liées à l'aménagement du périmètre de el mehmel, dont la superficie atteint 400 hectares. Cette analyse permettra de quantifier l'investissement global nécessaire à la réalisation du projet.

À cette fin, les travaux ont été répartis en trois lots principaux :

- Lot 1 : Construction du réseau d'adduction et de distribution, avec l'ensemble des pièces spéciales ;
- Lot 2 : Installation du système de pompage ;
- Lot 3 : Réalisation du bassin d'aspiration et des équipements annexes.

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

Pour garantir une installation de tuyauterie efficace, tout en minimisant les impacts environnementaux et en assurant une exploitation sûre du réseau, ces étapes doivent être suivies attentivement.

❖ Creusement de la tranchée

La première phase consiste à effectuer les fouilles à l'aide d'une pelle mécanique. Les déblais extraits sont généralement déposés d'un seul côté de la tranchée, tandis que l'autre côté est réservé au stockage des conduites et à leur préparation (bardage) avant la pose.

❖ Mise en place d'un lit de sable

Avant la mise en place des tuyaux, un lit de sable d'une épaisseur de 14 cm est étalé au fond de la tranchée. Ce lit a pour rôle d'amortir les charges et de protéger la conduite contre les irrégularités et les aspérités du sol.

❖ Pose des conduites

Avant leur installation, les tuyaux sont soumis à une inspection visuelle visant à écarter ceux présentant des défauts ou des dommages éventuels. Ils sont ensuite déposés délicatement au fond de la tranchée à l'aide d'un engin de levage. Un soin particulier est apporté à leur alignement afin de faciliter les opérations de raccordement et d'assurer la continuité hydraulique du réseau.

❖ Essais de pression et de joints

Avant d'effectuer le remblayage, il est indispensable de vérifier la résistance mécanique des conduites ainsi que l'étanchéité des joints. L'essai consiste à remplir le réseau d'eau sous une pression équivalente à 1,8 fois la pression de service nominale, maintenue pendant environ 30 minutes. La pression ne doit pas varier de plus de 0,2 bar durant toute la durée du test.

❖ Pose d'un grillage avertisseur

Un grillage avertisseur est placé à une profondeur déterminée au-dessus des conduites. Ce dispositif permet de signaler la présence du réseau lors de travaux de terrassement ultérieurs et contribue à prévenir les dommages accidentels.

❖ Remblaiement

Une fois les essais concluants, la tranchée est remblayée en couches successives, en veillant à ne pas endommager les conduites. Le remblai est compacté progressivement pour garantir la stabilité du sol au-dessus du réseau.

❖ Transport des terres excédentaires

Les matériaux excavés qui ne peuvent être réutilisés ou qui sont en surplus sont transportés vers une zone de dépôt agréée. Cette opération permet de maintenir un chantier propre et de se conformer aux exigences environnementales en vigueur.

❖ Nivellement et compactage

Une fois le remblai effectué, le terrain est nivelé afin de rétablir une surface uniforme et stable. Un compactage est ensuite réalisé pour densifier le sol, renforcer sa cohésion et assurer une stabilité durable de l'ouvrage.

VII.3 Volumes de terrassement

VII.3.1 Dimensions de la tranchée

❖ Largeur de la tranchée

La largeur du fond de la tranchée est déterminée en fonction du diamètre de la conduite à poser. Elle se calcule 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 définie de manière à garantir une pose adéquate des conduites, à faciliter les opérations de raccordement et à éviter toute interférence avec les autres réseaux enterrés.

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

Avec :

- **H_{tr}** : 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_{vtr}** : surface verticale de la tranchée (m²)
- **H_{tr}** : profondeur de la tranchée (m)
- **B** : largeur du fond de la tranchée (m)

❖ Surface horizontal :

La surface horizontale représente la projection au sol de la tranchée, c'est-à-dire la surface du fond plat de l'excavation. Elle est déterminée à l'aide de la formule suivante :

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

Avec :

- S_{htr} : surface horizontale de la tranchée (m^2)
- L_{tr} : 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 :

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

- 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 horizontale	déblai (m³)	Sable (m³)	Conduites (m³)	Remblai (m³)	Transport des terres
Ø75	540,00	0,68	1,28	0,86	364,50	464,74	36,45	2,38	425,90	38,83
Ø90	184,53	0,69	1,29	0,89	127,33	164,25	12,73	1,17	150,34	13,91
Ø110	848,42	0,71	1,31	0,93	602,38	789,12	60,24	8,06	720,82	68,3
Ø125	1721,24	0,73	1,33	0,96	1247,9	1653,47	124,79	21,11	1507,56	145,9
Ø140	582	0,74	1,34	0,99	430,68	577,11	43,07	8,95	525,09	52,02
Ø160	700,81	0,76	1,36	1,03	532,62	724,36	53,26	14,08	657,01	67,35
Ø200	260,25	0,8	1,4	1,12	208,2	291,48	20,82	8,17	262,49	28,99
Ø250	587,52	0,83	1,43	1,18	484,7	690,7	48,47	23,35	618,88	71,82
Ø315	4282,73	0,92	1,52	1,39	648,92	983,11	64,89	55,24	862,98	120,13
Ø350	132,28	0,97	1,57	1,53	128,58	202,12	12,86	14,37	174,89	27,23
Ø400	390,38	1,02	1,62	1,66	398,97	647,13	39,9	54,57	552,66	94,47
Ø560	531,45	1,12	1,72	1,93	596,29	1026,81	59,63	113,68	853,5	173,31
				Total	8676,33	12703,3	867,63	601,11	11234,62	1468,74

VII.3.2 Evaluation du cout des travaux de terrassement :

L'évaluation des coûts liés aux travaux de terrassement doit intégrer plusieurs composantes essentielles, notamment :

- Les opérations de déblais et de remblais ;
- L'approvisionnement en matériaux, tels que le sable pour le lit de pose ;
- Le transport des déblais excédentaires vers une zone de dépôt autorisée.

Le calcul des frais de terrassement s'effectue selon la méthode suivante :

❖ Déblais

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

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

❖ Remblais

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

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

❖ Lit de sable

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

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

❖ Transport des terres

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

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

❖ Nivellement et compactage

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

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

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 ³	12703,37	400,00	5081346,09
Remblais	M ³	11234,62	200,00	2246924,06
Sable	M ³	867,63	2500,00	2169082,97
Transport des terres	M ³	1468,74	350,00	514060,73
Nivellement et compactage	ML	8676,33	150,00	1301449,78
Prix total (HT)				11312863,62
TVA 19%				2149444,09
Total TTC				13462307,71

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	540,00		PEHD	291,1	/	36.450,00	193.644,00
Ø90	184,53		PEHD	494,8	/	12.732,57	104.038,01
Ø110	848,42		PEHD	861,7	/	60.237,82	791.321,33
Ø125	1721,24	64	PEHD	1029,8	950.00	124.789,90	1.979.798,69
Ø140	582,00	157	PEHD	1875,825	950.00	43.068,00	1.284.250,96
Ø160	700,81	105	PEHD	1745,9	950.00	53.261,56	1.415.972,82
Ø200	260,25	163	PEHD	3490,2	2 000.00	20.820,00	1.512.844,55
Ø250	587,52	252	PEHD	3017	2 000.00	48.470,40	2.325.851,57
Ø315	4282,73	632	Fonte	7569,54	3 000.00	391.869,80	34.705.550,84
Ø350	132,28	627	Fonte	7516,6	3 500.00	12.857,62	3.202.995,13
Ø400	390,38	709	Fonte	8490	4 000.00	39.896,84	6.188.223,04
Ø560	531,45	900	Fonte	10800	5 000.00	59.628,69	10.299.288,69
Prix total (HT)							63.810.135,63
TVA 19%							12.123.925,77
Total TTC							75.934.061,3997

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	19	12500	237500
Borne A4	18	22400	403200
Té	21	1230	25830

Vanne de sectionnement	2	23000	46000
Vanne	10	10890	108900
Coude 90°	9	1200	10800
Prix total (HT)			832230
TVA 19%			158123,7
Total TTC			990353,7

VII.6 Estimation des coûts du réservoirs et des pompes de refoulement :

Les prix d'exécution du réservoirs ainsi que les pompes de refoulement sont détaillés dans les tableaux VII.5 et VII.5 et VII.7

Tableau VII.5: Estimation du coût des pompes de refoulement.

Types des travaux	Unité de mesure	Quantités	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Pompes	/	4	600000	2400000
Chambre pour l'armoire électrique	Forfait	2	100000	200000
Prix total (HT)				2594200
TVA 19%				494000
Total TTC				3094000

Tableau VII.6: Estimation du coût du réservoir 1000m3

Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Décapage de la terre végétale	M ³	67	300	20000
Déblai	M ³	87	400	34666,66667
Remblai	M ³	60	600	36000
Béton armé	M ³	200	12000	2400000
Installation du coup de Bélier	U	1	5000000	3333333,333
Armoire électrique	U	1	200000	133333,3333
Portail métallique	U	1	180000	120000
Electricités	U	10	10000	100000
Peinture	M ²	213	2500	533333,3333
Revêtement	M ²	13	20000	266666,6667
Total HT				6977333,333
Total TTC				8303026,667

Tableau VII.7: Estimation du coût du réservoir 250m3

Désignation des travaux	Unité	Quantité	Prix unitaire ajusté (DA)	Montant (DA)
Décapage de la terre végétale	M³	17	102,60	1.744,20
Déblai	M³	22	136,80	3.009,60
Remblai	M³	15	205,20	3.078,00
Béton armé	M³	50	4.103,94	205.197,00
Installation du coup de Bélier	U	1	1.709.976,26	1.709.976,26
Armoire électrique	U	1	68.399,05	68.399,05
Portail métallique	U	1	61.559,15	61.559,15
Electricités	U	3	3.419,95	10.259,85
Peinture	M²	54	854,99	46.169,46
Revêtement	M²	4	6.839,91	27.359,64
			Total HT	2.136.752,21
			Total TTC (TVA 19%)	2542735,13

VII.8 Estimation du cout de forage :**Tableau VII.8:** Estimation du cout de forage.

Nature.des actions	Quantité	Cout unitaire (DA)	Montant global (DA)
Forage	4	10000000	40000000

VII.7 Coût total de projet :

Le coût total du projet d'aménagement hydraulique agricole intègre notamment les équipements assurés par sept forages, pour un montant estimatif de 368millions de dinars, répartis comme suit :

Tableau VII.9 : Le coût total du projet.

Travaux	Montant TTC (DA)
Travaux de terrassement	13462307,71

Pose des conduites	75.934.061,40
Pièces spéciales	990353,7
réservoirs	13932859,8
7 Forages	40000000
Adduction totale	50000000
Coût total	194319582,61

Le coût total des travaux d'aménagement du périmètre est évalué à 194319582,61 DA (Cent quatre-vingt-quatorze millions trois cent dix-neuf mille cinq cent quatre-vingt-deux dinars et soixante et un centimes), conformément aux résultats de l'étude technique détaillée

VII.8 Conclusion :

L'étude technico-économique relative à l'aménagement hydro-agricole du périmètre d'El Mehmel, d'une superficie de 400 hectares, a permis d'évaluer le coût global du projet à Cent quatre-vingt-quatorze millions trois cent dix-neuf mille cinq cent quatre-vingt-deux dinars et soixante et un centimes (194319582,61 DA)

Ce montant englobe l'ensemble des travaux nécessaires à la réalisation du projet, incluant le terrassement, la mise en place du réseau de distribution, l'installation des pièces spéciales, la construction des réservoirs, l'acquisition des pompes, ainsi que les ouvrages d'adduction alimentés par sept forages .

Par ailleurs, le coût moyen à l'hectare est estimé à Quatre cent quatre-vingt-cinq mille sept cent quatre-vingt-dix-huit dinars et quatre-vingt-seize centimes (485798,96DA/ha), constituant ainsi une référence solide pour l'évaluation de la rentabilité et de la viabilité économique de l'opération.

Malgré l'importance de l'investissement initial, ce projet génère des retombées économiques et environnementales considérables. Il contribuera à une gestion plus rationnelle des ressources en eau, à une amélioration sensible de la productivité agricole et à une optimisation de l'efficacité de l'irrigation, garantissant ainsi la durabilité et la rentabilité de l'aménagement

Conclusion générale

Conclusion générale

La mise en valeur hydro-agricole d'un périmètre requiert une étude technique approfondie mobilisant diverses disciplines, notamment l'hydrogéologie, l'hydraulique, l'agronomie et l'économie. Cette approche intégrée vise à optimiser l'usage de la ressource en eau tout en garantissant la durabilité des investissements agricoles.

Dans ce mémoire, l'analyse a porté sur le périmètre d'El Mehmel. Bien que doté de sols exploitables, ce dernier nécessite une gestion rationnelle de l'eau pour favoriser un développement agricole durable. L'étude a permis de concevoir un système d'irrigation sous pression, alimenté par quatre forages, deux réservoirs et une station de pompage, délivrant des pressions comprises entre **1,4 et 3,69 bars** aux bornes. Ces conditions permettent la mise en œuvre de techniques performantes, telles que l'aspersion et le goutte-à-goutte, adaptées aux contraintes climatiques locales.

Le réseau d'adduction proposé vise ainsi à sécuriser l'approvisionnement en eau, à améliorer l'efficacité hydraulique et à créer les conditions propices à l'intensification des cultures. Ce projet se présente comme un outil stratégique pour moderniser et dynamiser l'agriculture .

Liste des références

- [1] **DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU (DRE).** Étude pour la réalisation de système d'irrigation des périmètres – Périmètre : el mehmel . Khenchela. DRE, 2024.
- [2]**ONM (Office National de la Météorologie).** Données climatiques de la station de *Khenchela / El Mehmel*. ONM, [année].
- [3]**ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques).** Données pluviométriques de la station de *El Mehmel*. Algérie. ANRH, [année]
- [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 (consulté le 21 février 2025).
- [5] **AHBOUH, Leila et AZIEZ, Ouahiba.** Cours et exercices corrigés : Drainage et Assainissement Agricole. [Polycope]. Année universitaire 2021–2022. 122p
- [6] **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.
- [7] **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.

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).

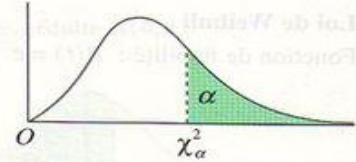
Second chiffre: avec faible humidité (HR min < 20%) et vent fort (> 5 m/s).

Annexe N°2 : Tableau de calcul de Khi carré théorique

Table de distribution de χ^2 (loi de K. Pearson)

La table donne la probabilité α , en fonction du nombre de degrés de liberté ν , pour que χ^2 égale ou dépasse une valeur donnée χ^2_α

$$\alpha = P(\chi^2 \geq \chi^2_\alpha)$$



ν	$\alpha = 0,990$	$\alpha = 0,975$	$\alpha = 0,950$	$\alpha = 0,900$	$\alpha = 0,100$	$\alpha = 0,050$	$\alpha = 0,025$	$\alpha = 0,010$	$\alpha = 0,001$
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 ν est supérieur à 30, on utilise la table de la loi normale (table de l'écart réduit) avec :

$$t = \sqrt{2\chi^2} - \sqrt{2\nu - 1}$$

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 _{dw} max
	CE _{es}	CE _{iw}	LR	CE _{es}	CE _{iw}	LR	CE _{es}	CE _{iw}	LR	CE _{es}	CE _{iw}	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 _{dw} max
	CE _{es}	CE _{iw}	LR	CE _{es}	CE _{iw}	LR	CE _{es}	CE _{iw}	LR	CE _{es}	CE _{iw}	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	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
POIVRE	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: La nouvelle fiche technique des asperseurs de type Pierrot.

Diamètres des buses	P (bar) 2,5	P (bar) 3,0	P (bar) 3,5	P (bar) 4,0	P (bar) 4,5	P (bar) 2,5 	P (bar) 3,0 	P (bar) 3,5 	P (bar) 4,0 	P (bar) 4,5 	P (bar) 5,0 	P (bar) 6,0 	P (bar) 7,0 	P (bar) 8,0 	P (bar) 9,0 	P (bar) 10,0 	P (bar) 12,0 	P (bar) 15,0 	P (bar) 20,0 	P (bar) 25,0 	P (bar) 30,0 	P (bar) 40,0 	P (bar) 50,0 	P (bar) 60,0 	P (bar) 80,0 	P (bar) 100,0 	P (bar) 120,0 	P (bar) 150,0 	P (bar) 200,0 	P (bar) 250,0 	P (bar) 300,0 	P (bar) 400,0 	P (bar) 500,0 	P (bar) 600,0 	P (bar) 800,0 	P (bar) 1000,0 	P (bar) 1200,0 	P (bar) 1500,0 	P (bar) 2000,0 	P (bar) 2500,0 	P (bar) 3000,0 	P (bar) 4000,0 	P (bar) 5000,0 	P (bar) 6000,0 	P (bar) 8000,0 	P (bar) 10000,0 	P (bar) 12000,0 	P (bar) 15000,0 	P (bar) 20000,0 	P (bar) 25000,0 	P (bar) 30000,0 	P (bar) 40000,0 	P (bar) 50000,0 	P (bar) 60000,0 	P (bar) 80000,0 	P (bar) 100000,0 	P (bar) 120000,0 	P (bar) 150000,0 	P (bar) 200000,0 	P (bar) 250000,0 	P (bar) 300000,0 	P (bar) 400000,0 	P (bar) 500000,0 	P (bar) 600000,0 	P (bar) 800000,0 	P (bar) 1000000,0 	P (bar) 1200000,0 	P (bar) 1500000,0 	P (bar) 2000000,0 	P (bar) 2500000,0 	P (bar) 3000000,0 	P (bar) 4000000,0 	P (bar) 5000000,0 	P (bar) 6000000,0 	P (bar) 8000000,0 	P (bar) 10000000,0 	P (bar) 12000000,0 	P (bar) 15000000,0 	P (bar) 20000000,0 	P (bar) 25000000,0 	P (bar) 30000000,0 	P (bar) 40000000,0 	P (bar) 50000000,0 	P (bar) 60000000,0 	P (bar) 80000000,0 	P (bar) 100000000,0 	P (bar) 120000000,0 	P (bar) 150000000,0 	P (bar) 200000000,0 	P (bar) 250000000,0 	P (bar) 300000000,0 	P (bar) 400000000,0 	P (bar) 500000000,0 	P (bar) 600000000,0 	P (bar) 800000000,0 	P (bar) 1000000000,0 	P (bar) 1200000000,0 	P (bar) 1500000000,0 	P (bar) 2000000000,0 	P (bar) 2500000000,0 	P (bar) 3000000000,0 	P (bar) 4000000000,0 	P (bar) 5000000000,0 	P (bar) 6000000000,0 	P (bar) 8000000000,0 	P (bar) 10000000000,0 	P (bar) 12000000000,0 	P (bar) 15000000000,0 	P (bar) 20000000000,0 	P (bar) 25000000000,0 	P (bar) 30000000000,0 	P (bar) 40000000000,0 	P (bar) 50000000000,0 	P (bar) 60000000000,0 	P (bar) 80000000000,0 	P (bar) 100000000000,0 	P (bar) 120000000000,0 	P (bar) 150000000000,0 	P (bar) 200000000000,0 	P (bar) 250000000000,0 	P (bar) 300000000000,0 	P (bar) 400000000000,0 	P (bar) 500000000000,0 	P (bar) 600000000000,0 	P (bar) 800000000000,0 	P (bar) 1000000000000,0 	P (bar) 1200000000000,0 	P (bar) 1500000000000,0 	P (bar) 2000000000000,0 	P (bar) 2500000000000,0 	P (bar) 3000000000000,0 	P (bar) 4000000000000,0 	P (bar) 5000000000000,0 	P (bar) 6000000000000,0 	P (bar) 8000000000000,0 	P (bar) 10000000000000,0 	P (bar) 12000000000000,0 	P (bar) 15000000000000,0 	P (bar) 20000000000000,0 	P (bar) 25000000000000,0 	P (bar) 30000000000000,0 	P (bar) 40000000000000,0 	P (bar) 50000000000000,0 	P (bar) 60000000000000,0 	P (bar) 80000000000000,0 	P (bar) 100000000000000,0 	P (bar) 120000000000000,0 	P (bar) 150000000000000,0 	P (bar) 200000000000000,0 	P (bar) 250000000000000,0 	P (bar) 300000000000000,0 	P (bar) 400000000000000,0 	P (bar) 500000000000000,0 	P (bar) 600000000000000,0 	P (bar) 800000000000000,0 	P (bar) 1000000000000000,0 	P (bar) 1200000000000000,0 	P (bar) 1500000000000000,0 	P (bar) 2000000000000000,0 	P (bar) 2500000000000000,0 	P (bar) 3000000000000000,0 	P (bar) 4000000000000000,0 	P (bar) 5000000000000000,0 	P (bar) 6000000000000000,0 	P (bar) 8000000000000000,0 	P (bar) 10000000000000000,0 	P (bar) 12000000000000000,0 	P (bar) 15000000000000000,0 	P (bar) 20000000000000000,0 	P (bar) 25000000000000000,0 	P (bar) 30000000000000000,0 	P (bar) 40000000000000000,0 	P (bar) 50000000000000000,0 	P (bar) 60000000000000000,0 	P (bar) 80000000000000000,0 	P (bar) 100000000000000000,0 	P (bar) 120000000000000000,0 	P (bar) 150000000000000000,0 	P (bar) 200000000000000000,0 	P (bar) 250000000000000000,0 	P (bar) 300000000000000000,0 	P (bar) 400000000000000000,0 	P (bar) 500000000000000000,0 	P (bar) 600000000000000000,0 	P (bar) 800000000000000000,0 	P (bar) 1000000000000000000,0 	P (bar) 1200000000000000000,0 	P (bar) 1500000000000000000,0 	P (bar) 2000000000000000000,0 	P (
------------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---	-----