



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 de Tarouma,
Secteur 2 (150 ha) à partir d'un forage, wilaya de Khenchela.**

Présenté par:
AISSA Samir

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
Mr. RASOUL Abdelaziz	Professeur	Président
Mme. AZIEZ Ouahiba	M.C. B	Examineur
Mme. SAIL Nadhira	M.C. B	Examineur
Mr. KERID Rachid	M.C. A	Examineur
Mme. SADOUNE Samra	M.C. A	Promoteur

Session : Septmbre 2025

Remerciements :

بسم الله الرحمن الرحيم

Je souhaite avant tout exprimer ma gratitude la plus sincère envers Allah, Le Miséricordieux, pour m'avoir accordé la santé, l'endurance et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Mes remerciements les plus profonds vont à Madame Sadoune Samra, qui a assuré l'encadrement de ce mémoire avec rigueur et bienveillance. Je lui suis particulièrement reconnaissant(e) pour sa disponibilité, la clarté de ses orientations, ainsi que pour l'attention constante qu'elle a portée à l'avancement de mes travaux.

Je tiens également à remercier chaleureusement Monsieur Rouabah Nadjim et Monsieur Ben Kahla Kamel, ingénieurs de l'État, pour leur accompagnement technique, leur précieuse collaboration, et les données essentielles qu'ils ont généreusement mises à ma disposition. Leur contribution a été déterminante dans la concrétisation de ce projet.

Ma reconnaissance s'étend à l'ensemble du corps professoral de l'École Nationale Supérieure d'Hydraulique, dont la qualité de l'enseignement, la richesse des apports scientifiques et l'engagement pédagogique ont profondément enrichi mon parcours académique.

Je n'oublie pas mes amis Sahraoui Mostafa, Soualhi Abdennacer, Ali Kissali et Mourdjan Riyadh, berrahiya, ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de ce chemin. Merci pour votre présence, vos encouragements et votre précieuse amitié.

Dédicaces :

Je dédie ce travail, avec tout l'amour et le respect que je leur porte, à mes parents, mon père et ma mère, dont le soutien moral indéfectible a toujours été une source de force et d'inspiration. Leur patience, leurs sacrifices discrets, leur sagesse et leurs prières m'ont accompagné et guidé à chaque étape de ce parcours. Ce travail modeste leur est offert en signe de reconnaissance et de gratitude, en témoignage de mon attachement profond et de ma haute estime. Quelles que soient les actions que je mène, je sais que je ne pourrai jamais leur rendre tout ce que je leur dois.

À mes sœurs, Safia et Siham, merci pour votre affection sincère, vos encouragements constants et votre présence précieuse à mes côtés.

À mes frères, Hicham, Karim et Brahim, je vous remercie pour votre soutien et la place particulière que vous occupez dans ma vie.

Ma reconnaissance s'étend également à l'ensemble de ma famille, pour leur appui et leur bienveillance tout au long de mon parcours universitaire.

Enfin, à toutes celles et ceux qui ont cru en moi, qui m'ont encouragé, épaulé ou inspiré d'une manière ou d'une autre, je vous adresse ici l'expression de ma gratitude la plus profonde.

ملخص:

تناولت هذه المذكرة دراسة وتصميم شبكة ري فعالة في محيط "ترومة – القطاع 2"، جنوب ولاية خنشلة، على مساحة 150 هكتارًا. وبحكم اعتماد المنطقة على المياه الجوفية نتيجة ندرة الأمطار، تم اقتراح نظام ري حديث يجمع بين الري بالتنقيط والري بالرش لضمان التسيير العقلاني للموارد المائية وتلبية احتياجات المحاصيل.

شملت الدراسة تحليل المعطيات المناخية وخصائص التربة والمعطيات الزراعية، مما أتاح وضع برنامج زراعي مناسب لتحسين المردودية وترشيد استهلاك المياه وتقليل التكاليف التشغيلية.

الكلمات المفتاحية: شبكة الري، الحفر، احتياجات المحاصيل، الموارد المائية، محيط ترومة.

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude et la conception d'un réseau d'irrigation efficace dans le périmètre de « Tarrouma – Secteur 2 », situé au sud de la wilaya de Khenchela, sur une superficie de 150 hectares. En raison de la dépendance de la région aux eaux souterraines, conséquence de la rareté des précipitations, un système d'irrigation moderne combinant le goutte-à-goutte et l'aspersion a été proposé, afin d'assurer une gestion rationnelle des ressources hydriques et de répondre aux besoins des cultures. L'étude a inclus l'analyse des données climatiques, des caractéristiques du sol et des données agricoles, ce qui a permis d'élaborer un programme agricole adapté visant à améliorer la productivité, à rationaliser la consommation en eau et à réduire les coûts d'exploitation.

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

Abstract:

This dissertation focuses on the study and design of an efficient irrigation network in the "Tarrouma – Sector 2" area, located in the south of Khenchela province, covering a surface of 150 hectares. Given the region's reliance on groundwater due to low rainfall, a modern irrigation system combining drip and sprinkler irrigation was proposed to ensure rational management of water resources and meet crop requirements. The study included an analysis of climatic data, soil characteristics, and agricultural conditions, which made it possible to establish an appropriate agricultural program aimed at improving productivity, optimizing water consumption, and reducing operating costs.

Keywords : Irrigation network, boreholes, crop water requirements, water resources, Tarrouma perimeter.

Sommaire

Introduction générale.....	11
-----------------------------------	-----------

Chapitre I : Analyse des conditions naturelles de la zone d'étude

I.1. Introduction	13
I.2. Situation géographique du site	13
I.2.1. Présentation de la wilaya kenchela	13
I.2.2. Présentation de la zone d'étude.....	14
I.2.3. Position du périmètre d'étude.....	14
I.3. Caractéristiques topographiques et pédologiques de la zone	15
I.3.1. Relief.....	15
I.3.2. Hydrographie	16
I.3.3. Géologie	16
I.3.4. Activité tectonique.....	16
I.3.5. Etude pédologique	17
I.4. Etude Climatologique	17
I.4.1. Choix de la station de référence.....	17
I.4.2. Température de l'air	18
I.4.3. L'humidité relative	19
I.4.4. Le Vent.....	20
I.4.5. Insolation	21
I.4.6. La Pluviométrie	21
I.5. Indices agrométéorologiques.....	22
I.5.1. Indice d'aridité de Martonne (1926)	22
I.5.2. Quotient Ombrothermique d'Emberger (1955)	23
I.5.3. Climagramme de BAGNOULS et GAUSSEN	24
I.6. Conclusion	25

Chapitre II : Ressource en sol et en eau

II.1. Introduction	27
II.2. Ressources en sol.....	27
II.2.1. Classification des sols.....	27
II.2.2. Caractéristique morphologique	27
II.2.3. Analyse physico-chimique des sols.....	29
II.2.4. Caractéristiques hydrodynamiques des sols	31
II.2.5. Les aptitudes culturales des sols.....	31
II.3. Ressources en eau	32
II.3.1. Etude de la qualité de l'eau d'irrigation	33

II.3.2. L'évaluation de la qualité de l'eau.....	34
II.3.3. Calcul de la pluie de projet.....	36
II.4. Choix des lois de probabilités	39
II.4.1. Test de validité d'un ajustement.....	41
II.4.2. Détermination de l'année de calcul	42
II.5. Conclusion	42

Chapitre III : : Calcul des besoins en eau des cultures

III.1. Introduction	44
III.2. Les besoins en eau d'irrigation.....	44
III.2.1. Calcul de l'évapotranspiration	45
III.2.2. Calcul de l'évapotranspiration de référence (ET ₀)	45
III.2.3. Calcul de la pluie efficace	47
III.2.4. Calcul de l'évapotranspiration maximale (ETM).....	48
III.2.5. Assolement des Cultures (Choix des Cultures)	48
III.3. Estimation des besoins en eau des cultures choisies.....	50
III.3.1. Les besoins de lessivage	50
III.4. Calcul des besoins en eau pour les assolements 1 et 2.....	56
III.5. Calcul des débits Spécifiques	57
III.6. Calcul débit caractéristique.....	58
III.7. Les volumes d'eau d'irrigation	59
III.8. Conclusion	59

Chapitre IV : Etude du system d'adduction et de distribution

IV.1. Introduction.....	61
IV.2. Alimentation en eau du périmètre.....	61
IV.3. Organisation du périmètre.....	61
IV.3.1. Ilots et bornes d'irrigation.....	61
IV.3.2. Rôle et fonction de la borne d'irrigation	62
IV.3.3. Calcul hydraulique des bornes.....	62
IV.4	62
IV.5. Etude de système de pompage.....	62
IV.5.1. Types des pompes utilisé	63
IV.5.2. Hauteur manométrique totale	63
IV.5.3. Calcul du débit de refoulement	65
IV.5.4. Calcul du diamètre approximatif.....	65
IV.5.5. Choix de nombre et de type de pompe	68
IV.5.6. Dimensionnement du bassin de stockage.....	71
IV.6. Etude du système d'adduction-distribution	72

IV.6.1. Calcul des diamètres	72
IV.6.2. Calcul des pertes de charge linéaires	73
IV.6.3. Calcul des pressions des nœuds et des bornes	74
IV.7. Conclusion	78

Chapitre V : Les Techniques d'irrigation

V.1. Introduction	80
V.2. Les principales techniques d'irrigation	80
V.2.1. Irrigation par aspersion	80
V.2.2. Irrigation localisée (goutte-à-goutte)	81
V.2.3. Irrigation par gravité (surface)	82
V.2.4. Irrigation par submersion	82
V.2.5. Irrigation par pivot central	83
V.3. Conclusion	84

Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle

VI.1. Introduction	86
VI.2. Dimensionnement d'un réseau d'irrigation Goutte à goutte.....	86
VI.2.1. Besoins d'irrigation des cultures en irrigation localisée.....	86
VI.3. Calculs hydrauliques	89
VI.3.1. Variation maximale du débit selon la règle de Christiansen.....	89
VI.3.2. Dimensionnement des canalisations du réseau	91
VI.4. Dimensionnement d'un réseau d'irrigation par aspersion.....	94
VI.4.1. Données générales	94
VI.4.2. Calcul de la dose pratique	95
VI.4.3. Dimensionnement de l'asperseur.....	95
VI.4.4. Calcul des écartements	96
VI.4.5. Vérification de la pluviométrie de la buse	96
VI.4.6. Détermination des paramètres d'arrosages.....	97
VI.4.7. Calcul hydraulique des rampes et la porte rampe	99
VI.5. Conclusion	102

Chapitre VII : Etude technico-économique

VII.1. Introduction	104
VII.2. Les phases d'installation du réseau d'adduction et de distribution.....	104
VII.3. Volumes de terrassement	105
VII.3.1. Dimensions de la tranchée	105
VII.3.2. Evaluation du cout des travaux de terrassement.....	107
VII.4. Evaluation des prix de pose des conduites.....	109
VII.5. Estimation du coût des pièces spéciales	109

VII.6. Estimation des coûts du bassin d'aspiration et des pompes de refoulement :	110
VII.7. Estimation du cout de forage.....	110
VII.8. Coût total de projet.....	111
VII.9. Conclusion	112
Conclusion générale	114

Liste des tableaux :

Chapitre I : Analyse des conditions naturelles de la zone d'étude

Tableau I-1 : Coordonnées de station météorologique d'Negrine	17
Tableau I-2 : Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Negrine	18
Tableau I-3 : humidité relative moyenne mensuelle de la station d'negrine (2013-2023)	19
Tableau I-4 : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station de Negrine (2013-2023).....	20
Tableau I-5 : l'insolation de à la station de Negrine (2013-2023).....	21
Tableau I-6 : Répartition mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation de la station de Negrine (1994-2024).....	21
Tableau I-7 : Classification du climat selon de Martonne.....	23

Chapitre II : Ressource en sol et en eau.

Tableau II-1 : L'analyse des profils au laboratoire	29
Tableau II-2 : Caractéristiques hydrodynamiques des sols.....	31
Tableau II-3 : Les espèces culturales	31
Tableau II-4 : Caractéristiques principale du forage.....	33
Tableau II-5 : Caractéristiques chimique de l'eau d'irrigation	33
Tableau II-6 : Classification des eaux en fonction de la conductivité électrique.....	34
Tableau II-7 : Classification des eaux en fonction du SAR.....	35
Tableau II-8 : Caractéristique de la station	36
Tableau II-9 : Précipitations moyennes mensuelles couvrant la période de (1995 à 2024)	36
Tableau II-10 : Caractéristiques de la série pluviométrique.....	37
Tableau II-11 : les étapes d'homogénéisation de la série.....	38
Tableau II-12 : Test de validité des deux ajustements.....	41
Tableau II-13 : Résultat de l'ajustement	42
Tableau II-14 : calcul des pluies mensuelles pour l'année sèche (freq = 80 %).....	42

Chapitre III : : Calcul des besoins en eau des cultures

Tableau III-1 : Evapotranspiration de référence ET0 calculée par le logiciel COPWAT	47
Tableau III-2 : Calcul des pluies efficaces.....	48
Tableau III-3 : Répartition des surfaces agricoles selon l'assolement proposé	49
Tableau III-4 : Assolements des cultures	49
Tableau III-5 : Coefficients culturaux (Kc) des cultures sélectionnées	50
Tableau III-6 : Calcul des besoins en eau pour le Blé	52
Tableau III-7 : Calcul des besoins en eau pour l'orge en grain	52

Tableau III-8 : Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre.....	53
Tableau III-9 : Calcul des besoins en eau pour la betterave	53
Tableau III-10 : Calcul des besoins en eau pour l'oignon	54
Tableau III-11 : Calcul des besoins en eau pour l'Ail	54
Tableau III-12 : Calcul des besoins en eau pour l'olivier.....	55
Tableau III-13 : Calcul des besoins en eau pour Le Sorgho	55
Tableau III-14 : Calcul des besoins en eau pour l'Avoine	56
Tableau III-15 : Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 1	56
Tableau III-16 : Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 2	57
Tableau III-17 : volume d'eau d'irrigation	59

Chapitre V : Les Techniques d'irrigation

Tableau IV-1 : Type de bornes en fonction de Débit fourni.....	Error! Bookmark not defined.
Tableau IV-2 : Calcul des débits des ilots et choix du type de borne.....	Error! Bookmark not defined.
Tableau IV-3 : Résultats du calcul de la HMT pour différents diamètres	65
Tableau IV-4 : Estimation des frais d'investissement selon le diamètre de la conduite.	66
Tableau IV-5 : Estimation des frais d'exploitation selon le diamètre de la conduite.	67
Tableau IV-6 : Bilan total des frais	68
Tableau IV-7 : Choix du nombre de pompes de secours.....	69
Tableau IV-8 : Choix de nombre de pompes.....	69
Tableau IV-9 : Variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.....	71
Tableau IV-10 : Variation de la pression de vapeur en fonction de la température de l'eau.....	71
Tableau IV-11 : Les calculs hydrauliques du réseau de distribution	74

Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle

Tableau VI-1 : : les pertes de charge au niveau de la rampe et de la porte-rampe.	94
Tableau VI-2 : les pertes de charge au niveau des conduites	102

Chapitre VII : Etude technico-économique

Tableau VII-1 : Calcul des différents volumes	107
Tableau VII-2 : le coût estimatif des travaux de terrassement.....	108
Tableau VII-3 : Estimation des coûts de mise en place des conduites.....	109
Tableau VII-4 : Estimation du coût des pièces spéciales	109
Tableau VII-5 : Estimation du coût du bassin d'aspiration, des pompes de refoulement.....	110
Tableau VII-6 : Estimation du cout de forage	110
Tableau VII-7 : Le coût total du projet	112

Liste des figures :

Chapitre I : Analyse des conditions naturelles de la zone d'étude

Figure I-1 : localisation géographique de la wilaya d'khenchela.....	13
Figure I-2: Carte de la situation géographique de la zone d'étude.....	14
Figure I-3 : localisation de secteur B dans le périmètre tarrouma.....	15
Figure I-4 : Carte des altitudes de la wilaya de khenchela.....	16
Figure I-5 : Variations des moyennes annuelles des températures	18
Figure I-6 : Evolution mensuelle de l'humidité relative de la station d'Negrine.....	19
Figure I-7 : Evolution mensuelle du vent de la station des Negrine	20
Figure I-8 : Moyenne mensuelles de l'insolation.....	21
Figure I-9 : Evolution mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation de la station de Negrine (1994-2019).....	22
Figure I-10 : Diagramme bioclimatique d'Emberger (Station de Negrine)	24
Figure I-11 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen	25
Figure I-12 : carte pluviométrique pour l'Algérie du nord (ANRH, 2012)	Error!

Bookmark not defined.

Chapitre II : Ressource en sol et en eau.

Figure II-1 : Triangle textures des sols étudiés	30
Figure II-2 : Diagramme de classification de l'eau d'irrigation	36
Figure II-3 : Ajustement des pluies annuelles aux lois normal	39
Figure II-4 : Résultat d'ajustement des pluies annuelles aux lois normal.....	40
Figure II-5 : Ajustement des pluies annuelles aux lois log normal	40
Figure II-6 : Résultat d'ajustement des pluies annuelles aux lois log normal	41

Chapitre III : : Calcul des besoins en eau des cultures

Figure IV-1 : Bilan économique total en fonction des diamètres étudiés.....	68
Figure IV-2 : Courbe de fonctionnement de la pompe choisie.....	69
Figure IV-3 : Présentation du réseau sur logiciel EPANET	77

Chapitre V : Les Techniques d'irrigation

Figure V-1 : L'irrigation par aspersion	80
Figure V-2 : L'irrigation par goutte à goutte	81
Figure V-3 : : L'irrigation par gravité	82
Figure V-4 : L'irrigation par submersion	83
Figure V-5 : L'irrigation par pivot central.....	83

Liste des planche :

Planche N1: plan de localization du perimeter Tarrouma Secteur 2.

Planche N2: Plan d'adduction et de destrubution du Tarrouma Secteur 2.

Planche N3: Profil n long de la conduite principal de distribution du Tarrouma Secteur 2.

Planche N4: Plan de Reseau d'irrigation Goutte à Goutte.

Introduction générale

Face aux enjeux croissants liés au changement climatique, à la dégradation des écosystèmes et à la pression continue sur la sécurité alimentaire, la gestion durable de l'eau d'irrigation représente aujourd'hui une priorité stratégique, notamment dans les zones arides et semi-arides. Dans ces régions, l'agriculture demeure un pilier économique essentiel, mais elle se heurte à de fortes contraintes dues à la rareté des ressources en eau.

L'Algérie, caractérisée en grande partie par un climat semi-aride, connaît une intensification du stress hydrique, marquée par la surexploitation des nappes phréatiques et une répartition inégale des ressources disponibles. Cette situation exige des réponses techniques adaptées, basées sur l'économie d'eau et la modernisation des systèmes d'irrigation afin d'améliorer l'efficacité de l'usage agricole de l'eau.

La région de Babar, située au sud de la wilaya de Khenchela, illustre parfaitement cette problématique. Malgré un potentiel foncier non négligeable, le développement agricole y reste limité, freiné par le déficit hydrique et l'absence d'infrastructures adéquates. Le périmètre de Tarrouma constitue un exemple concret nécessitant une valorisation ciblée par des solutions d'aménagement rationnelles.

Dans ce cadre, le présent mémoire porte sur une étude d'aménagement hydro-agricole dans la wilaya de Khenchela, axée sur la mobilisation des ressources souterraines, l'installation d'un réseau d'irrigation sous pression et l'optimisation des apports en eau à la parcelle. L'objectif principal est de mettre en place un système durable et adapté aux réalités locales, capable de répondre aux besoins hydriques des cultures agricoles, de renforcer la sécurité alimentaire et de promouvoir le développement de l'agriculture dans la région. Le mémoire s'appuie sur une méthodologie structurée, articulée autour d'un ensemble de chapitres, afin de garantir une analyse cohérente et une approche scientifique du projet.

Chapitre I : Analyse des conditions naturelles de la zone d'étude

I.1. Introduction :

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

I.2. Situation géographique du site :

I.2.1. Présentation de la wilaya khenchela :

La wilaya de Khenchela est située à l'est de l'Algérie et s'étend sur une superficie de 9.715,6 km². Elle est composée de 08 daïras et de 21 communes et compte 469510 habitants (Estimation 2022).

La diversité climatique de la wilaya de Khenchela lui confère un attrait touristique certain en plus de ses nombreuses sources thermales (Hammam Essalihine, Hammam elknif ...) et sites archéologiques de l'époque romaine. L'agriculture et l'élevage constituent l'essentiel des ressources avec 84.6 % du territoire de la wilaya affecté à l'agriculture [1].

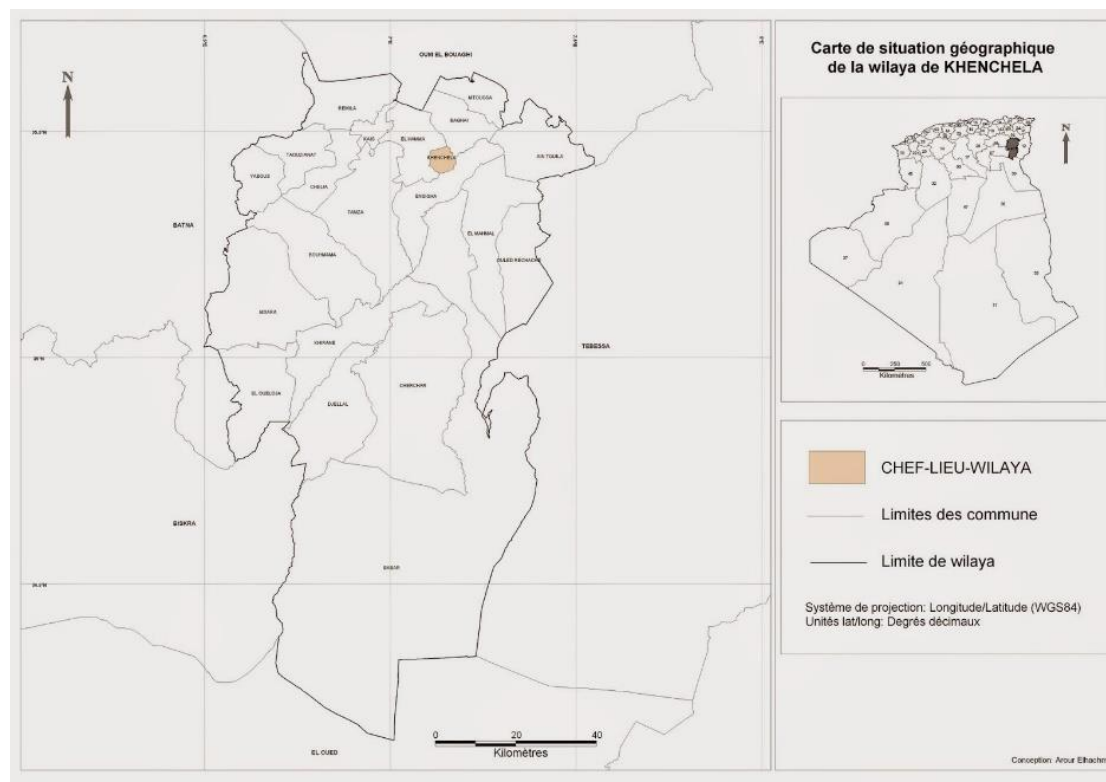


Figure I-1 : localisation géographique de la wilaya d'khenchela.

(Source : [khenchela - gifex.com](http://khenchela-gifex.com))

I.2.2. Présentation de la zone d'étude :

Notre zone d'étude appartient administrativement à la commune de Babar en même temps chef-lieu de daïra d'une très grande superficie de l'ordre de 355000 Ha soit 3550 Km², elle occupe à elle seule quelque 36% (plus du 1/3) de la surface totale de la wilaya de Khenchela. Sur le plan administratif, la Daïra de Babar englobe sous sa tutelle uniquement la commune de Babar. Elle est délimitée.

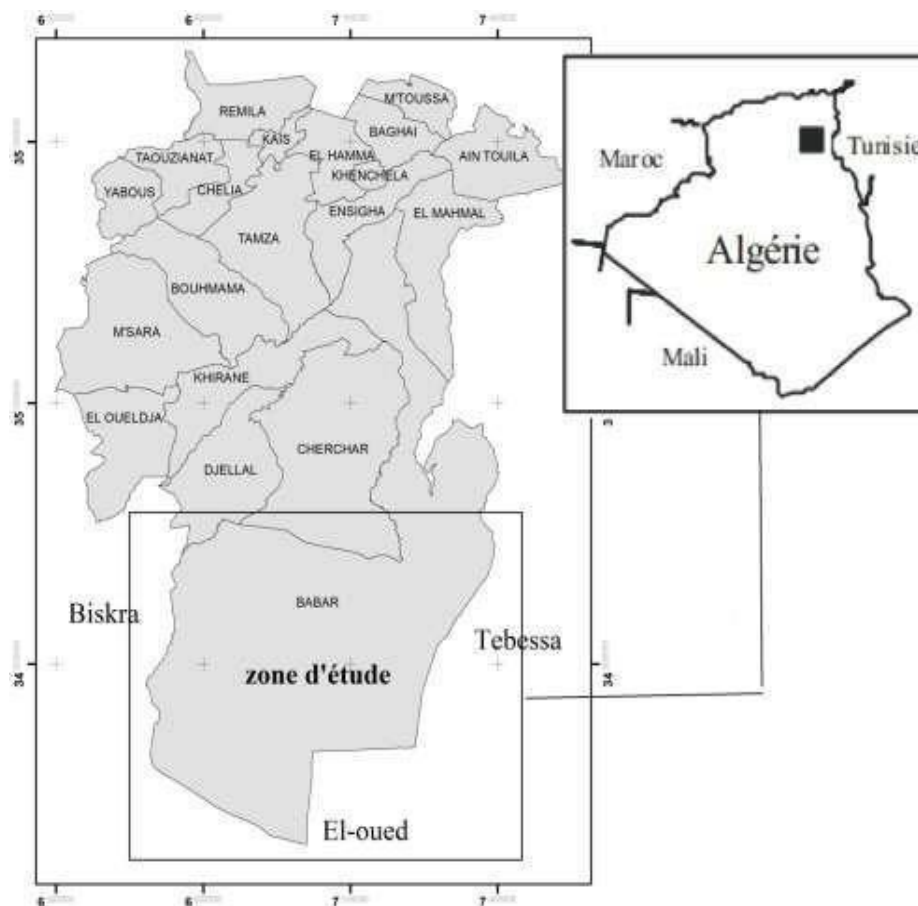


Figure I-2: Carte de la situation géographique de la zone d'étude.

Elle est délimitée.

- À l'Est par la commune de Kheirane, Chachar et la wilaya de Biskra.
- À l'Ouest par la commune d'El mahmel, Ouled Rechache et la wilaya de Tébéssa.
- Au Nord par la commune de Nsigha.
- Au Sud par la wilaya d'El Oued.

I.2.3. Position du périmètre d'étude :

Le périmètre Tarouma (Secteur B) est situé dans le sud de la commune de Babar et couvre une superficie de 150 hectares.

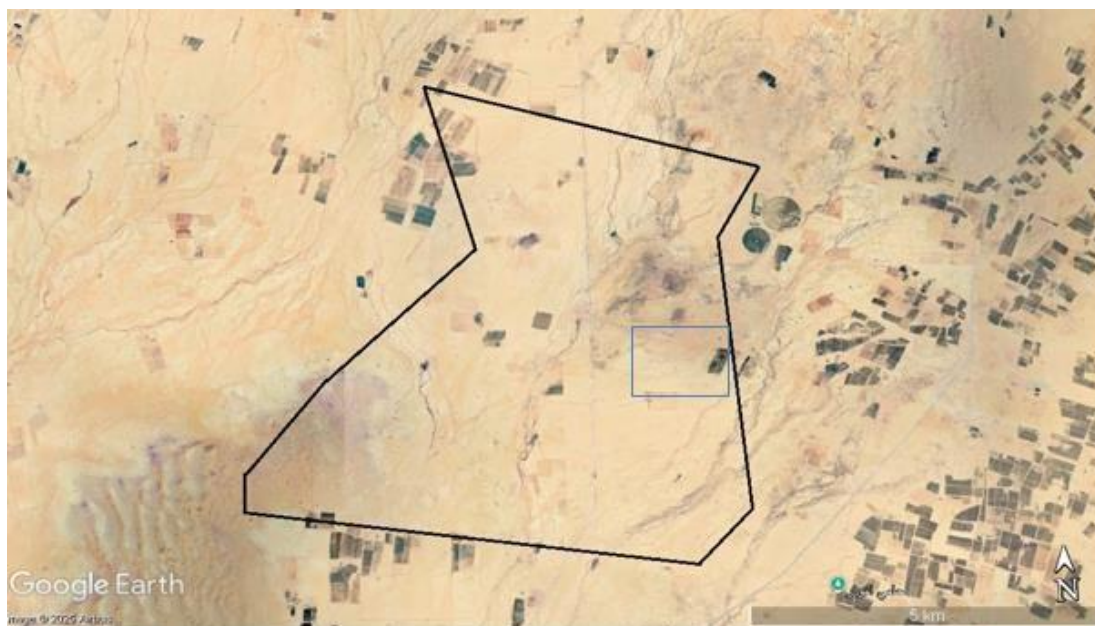


Figure I-3 : localisation de secteur B dans le périmètre tarrouma.

Source : (Google Earth 2025)

La carte ci-dessus présente une vue satellite du périmètre total de Tarrouma, s'étendant sur une superficie totale de 1 200 hectares (délimité en noir).

À l'intérieur de ce périmètre, la zone encadrée en bleu correspond au secteur B, qui constitue la zone d'étude du projet. Ce secteur, d'une superficie de 150 hectares.

I.3. Caractéristiques topographiques et pédologiques de la zone :

I.3.1. Relief :

Le chef-lieu de la zone d'étude est situé à 40 km du chef-lieu de la wilaya de Khenchela. Il s'agit d'une commune caractérisée par un relief complexe, dominé par deux types principaux : une zone montagneuse au nord et au centre (monts des Nememcha et de Zoui), et une plaine alluviale au sud, correspondant à la zone d'épandage des crues du plateau présaharien.

L'absence de voies de communication rapides couvrant l'étendue du territoire communal, notamment pour relier les principales agglomérations voisines, conjuguée à l'état de dégradation du réseau existant et à la faible desserte de la partie sud de la commune, accentue l'isolement de cette dernière. Ainsi, en raison de sa vaste superficie et du manque d'infrastructures, la commune — en particulier sa partie sud, objet de notre étude - se trouve dans une situation d'enclavement. [3]

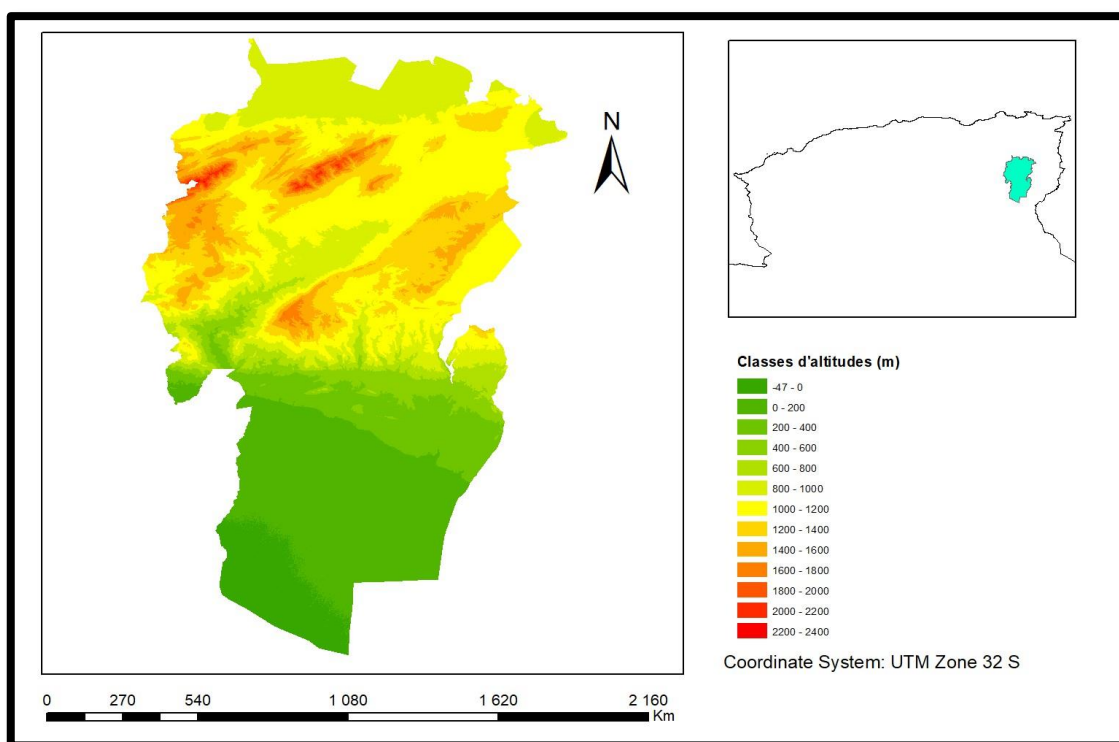


Figure I-4 : Carte des altitudes de la wilaya de khenchela.

Source : (ArcGis 2025)

I.3.2. Hydrographie :

Babar est située dans une zone semi-aride, caractérisée par une pluviométrie faible et irrégulière, une évapotranspiration élevée et une recharge limitée des nappes phréatiques. Les principales ressources en eau dans la commune proviennent de forages dont la profondeur varie généralement entre 400 m et 600 m, ainsi que de quelques oueds intermittents.[4]

I.3.3. Géologie :

La zone repose sur une structure géologique composée principalement de formations sédimentaires (calcaires, grès et argiles) datées du Jurassique au Quaternaire. Les calcaires et dolomies souvent fracturés forment les principaux aquifères favorisant la circulation et le stockage des eaux souterraines. En revanche les marnes et argiles jouent un rôle imperméable. La géologie de la zone influe directement sur la disponibilité et la qualité des ressources en eau.[2]

I.3.4. Activité tectonique :

La région de Babar, située dans l'Est algérien au niveau de la chaîne de l'Atlas saharien et proche des monts de Nememcha, est caractérisée par une activité tectonique ancienne liée aux orogénèses alpine et atlasique, marquée par des plissements, failles normales et inverses ainsi qu'une fracturation intense du Socle sédimentaire Cette tectonique a fortement influencé le relief et la répartition des formations géologiques locales.

Concernant l'activité tectonique actuelle, elle est relativement faible mais non nulle. La région de Babar fait partie d'un domaine tectonique atlasique où des mouvements sismiques légers peuvent survenir, modifiant localement la dynamique hydrogéologique.

En Algérie, la tectonique active est surtout concentrée dans le Tell au nord, mais des micro-activités sismiques existent aussi dans les zones montagneuses proches, comme dans les Aurès, dont Babar fait partie. Ces mouvements sont généralement liés à un régime compressif nord-sud et à des failles inverses actives localement [5].

I.3.5. Etude pédologique :

L'étude pédologique réalisée dans la région a permis d'identifier les caractéristiques principales des sols locaux.

Les analyses ont montré la présence de sols Calc magnésiques et bruns calcaires, généralement peu profonds mais adaptés à certaines cultures comme le blé et l'orge et les céréales.

La zone est également utilisée pour l'élevage bien que le surpâturage cause parfois une dégradation des sols.

Pour faire face à ces défis, des programmes de conservation des sols et de reboisement ont été mis en place par les autorités locales afin de préserver la fertilité des terres agricoles et protéger la biodiversité de la région [6].

I.4. Etude Climatologique :

La climatologie constitue un élément clé dans la planification et la gestion des projets d'irrigation, car elle influence directement le comportement hydraulique et, en particulier, le bilan hydrique des aquifères. La zone d'étude se situe dans le grand bassin du Chott Melghir, intégré au système aquifère du Sahara septentrional (SASS), et se caractérise par un climat semi-aride. Cette aridité se manifeste non seulement par des températures élevées en été et une faible pluviométrie, mais aussi par une évaporation intense, accentuée par la sécheresse de l'air, ce qui impacte fortement la disponibilité des ressources en eau.

I.4.1. Choix de la station de référence :

L'étude climatique du périmètre a été effectuée à partir des données enregistrées par la station météorologique de Negrine, localisée à environ 48 km de la zone d'étude, et constituant la station de référence la plus proche et caractérisée par les mêmes conditions géographiques que celles de la région étudiée (**voir tableau I.1**).

Les caractéristiques techniques de la station météorologique de Negrine sont les suivantes :

Tableau I-1: Coordonnées de station météorologique d'Negrine.

Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)	Période
Negrine	34° 29' 8" N	7° 31' 19" E	348	1994 - 2024

I.4.2. Température de l'air :

La température est un paramètre climatique essentiel, car elle influence directement les besoins hydriques des cultures. Elle conditionne notamment l'évapotranspiration, processus combinant l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration des plantes. Une élévation de la température entraîne une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui accroît la demande en eau pour maintenir le développement optimal des cultures. Les températures moyennes mensuelles, observées sur une période de onze ans (2013–2023), sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau I-2 : Température moyenne mensuelle (°C) à la station de Negrine
(2013-2023).

	Janv	Févr	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Moy
$T_{\max}$ (C°)	17.56	18.61	23.14	27.38	32.37	37.83	41.52	40.54	34.61	29.55	32.09	17.70	28.66
$T_{\min}$ (C°)	6.79	7.59	11.27	15.10	19.63	24.60	28.19	27.82	23.01	18.33	12.25	7.77	16.86
T_{moy} (C°)	12.17	13.1	17.21	21.24	26	31.22	35.22	34.85	28.81	23.94	22.17	12.73	22.76

Avec :

T_{min} : moyenne de toute la température minimum observée pour chaque mois .

T_{max} : moyenne de toute la température maximum observée pour chaque mois .

T_{moy} : moyenne mensuelle.

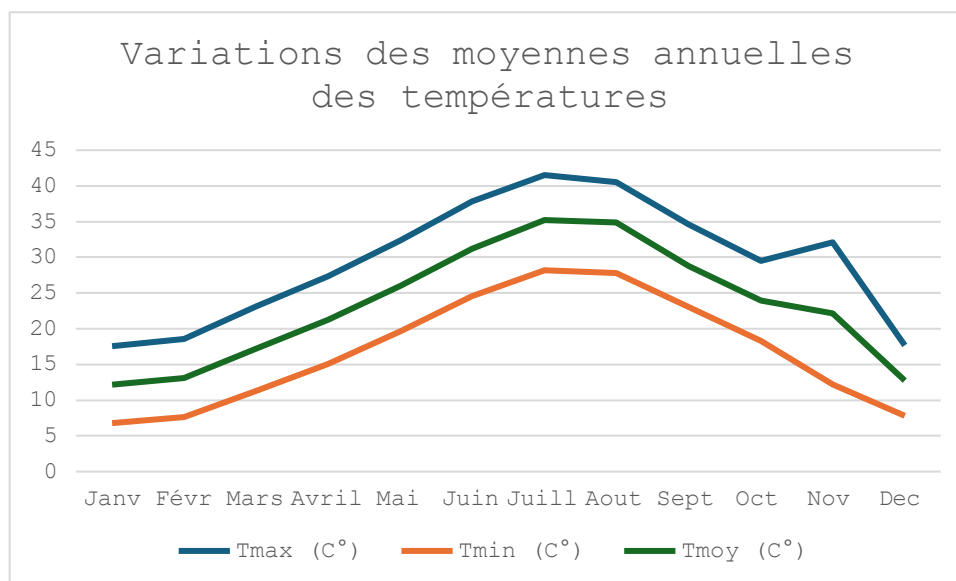


Figure I-5 : Variations des moyennes annuelles des températures.

• **Interprétation :**

Le tableau montre que les mois les moins chauds sont décembre à mars, avec des températures moyennes inférieures à 18°C, janvier étant le plus frais. L’été, de juin à août, est très chaud, avec des moyennes dépassant 34°C et des pics au-dessus de 40°C en juillet. Les mois de transition (avril, mai, septembre, octobre) restent chauds. Le climat général est chaud toute l’année, avec des étés extrêmes et des hivers doux.

I.4.3. L’humidité relative :

L’humidité désigne la quantité de vapeur d’eau présente dans l’air. Elle peut être exprimée en pourcentage, appelé humidité relative, qui indique la proportion de vapeur d’eau par rapport à la quantité maximale que l’air peut contenir à une température donnée.

Tableau I-3 : humidité relative moyenne mensuelle de la station d’negrine (2013-2023).

mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Humidité (%)	55.54	48.95	42.85	39.04	33.05	28.03	25.18	28.45	39.6	46.2	53.11	59.04	41.59

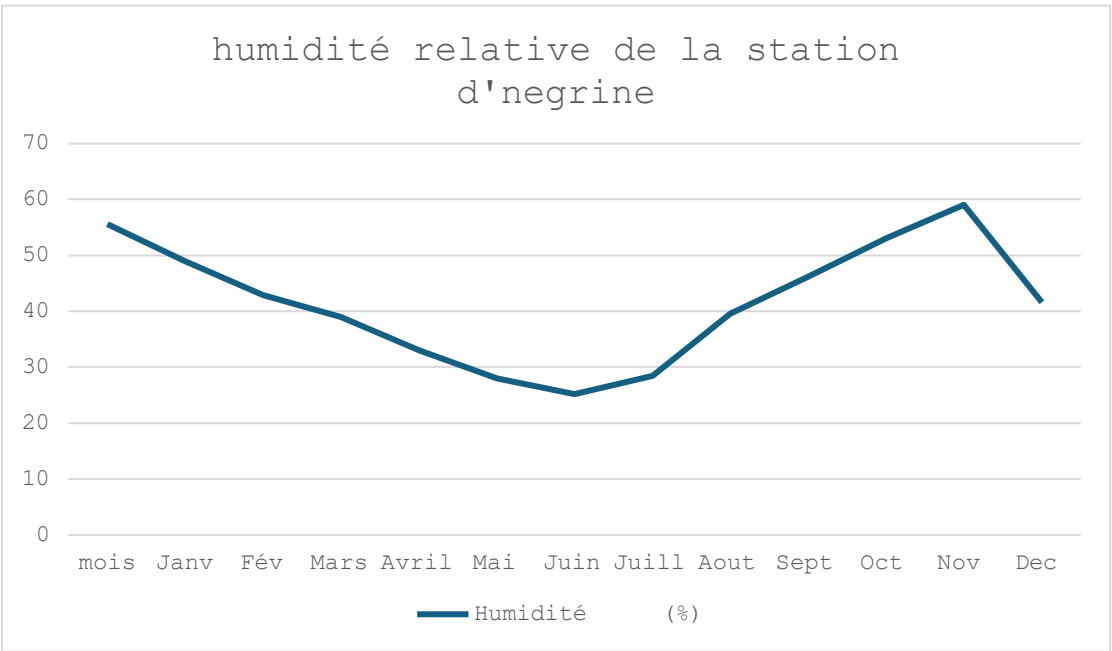


Figure I-6 : Evolution mensuelle de l’humidité relative de la station d’Negrine.

• **Interprétation :**

L’humidité est plus élevée en hiver, atteignant son maximum en décembre (59.04 %), et plus basse en été, surtout en juillet (25.18 %). Les mois de transition présentent une humidité modérée. Avec une moyenne annuelle de 41.59 %, le climat est globalement sec, notamment pendant la saison chaude.

I.4.4. Le Vent :

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluviaux de l'évapotranspiration et par conséquent le climat de la région.

Tableau I-4 : Moyenne mensuelle de la vitesse des vents en m/s à la station de Negrine (2013-2023).

Année	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Vent (m/s)	3.38	3.72	4.34	4.25	4.41	4.29	3.93	3.58	3.55	3.27	3.59	3.44	3.81

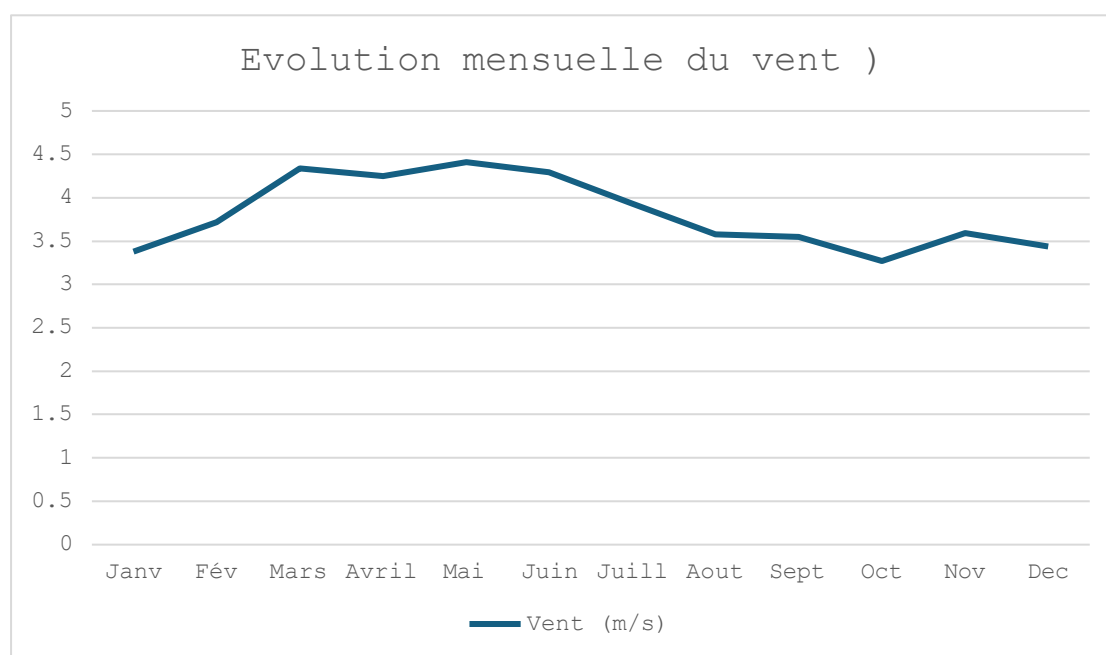


Figure I-7 : Evolution mensuelle du vent de la station des Negrine (2013-2023).

• Interprétation :

On remarque que les vents les plus forts se produisent durant les mois mars, avril et mai avec un maximum de 18,52 km/h en avril (fig. I.7.), les plus faibles sont enregistrés entre aout et octobre avec un minimum de 10,47 km/h en mois d'octobre. Usuellement, les vents sont de provenance sud-nord avec une vitesse moyenne annuelle de 13,49 km/h.

Il a noté qu'il existe un type de vent spécifique à cette région le sirocco, un vent sec et poussiéreux provenant du Sahara vers le nord le plateau saharien favorisant l'érosion éolienne.

I.4.5. Insolation :

En agriculture, l’insolation est la quantité de soleil reçue par une culture pendant un certain temps. Le tableau I.5, présente les durées moyennes mensuelles d'insolation.

Tableau I-5 : l'insolation de à la station de Negrine (2013-2023).

Année	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Moy
Insolation	7.8	8.7	9.4	10.3	11.3	12.2	13.1	12.4	10.2	9.6	7.8	7.2	10.2

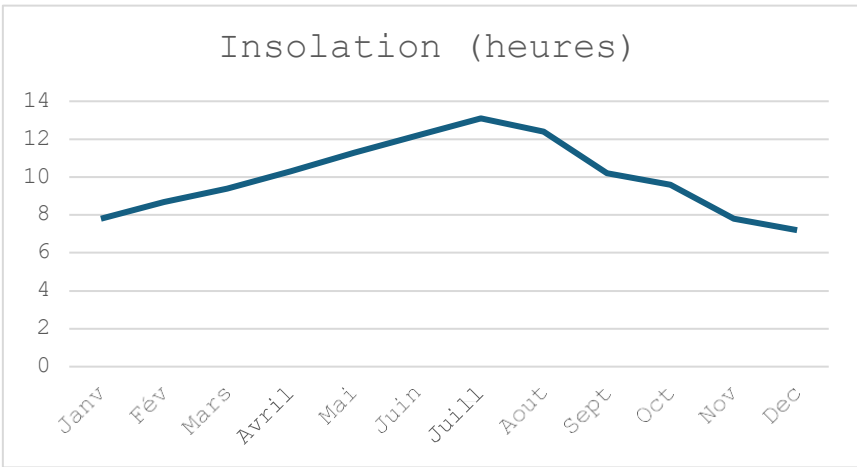


Figure I-8 : Moyenne mensuelles de l’insolation.

I.4.6. La Pluviométrie :

Connaître la quantité de pluie et la façon dont elle se répartit dans l’année est très important. Cela permet de comprendre le régime des pluies, ce qui aide à bien concevoir les réseaux d’irrigation et à gérer les arrosages.
Voici comment la pluie moyenne de l’année est répartie :

Tableau I-6 : Répartition mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation de la station de Negrine (1994-2024).

Année	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout	Moy
Pmoy (mm)	31.91	23.52	21.53	17.47	22.54	13.12	15.3	18.25	18.6	10.57	0.51	4.71	198.04

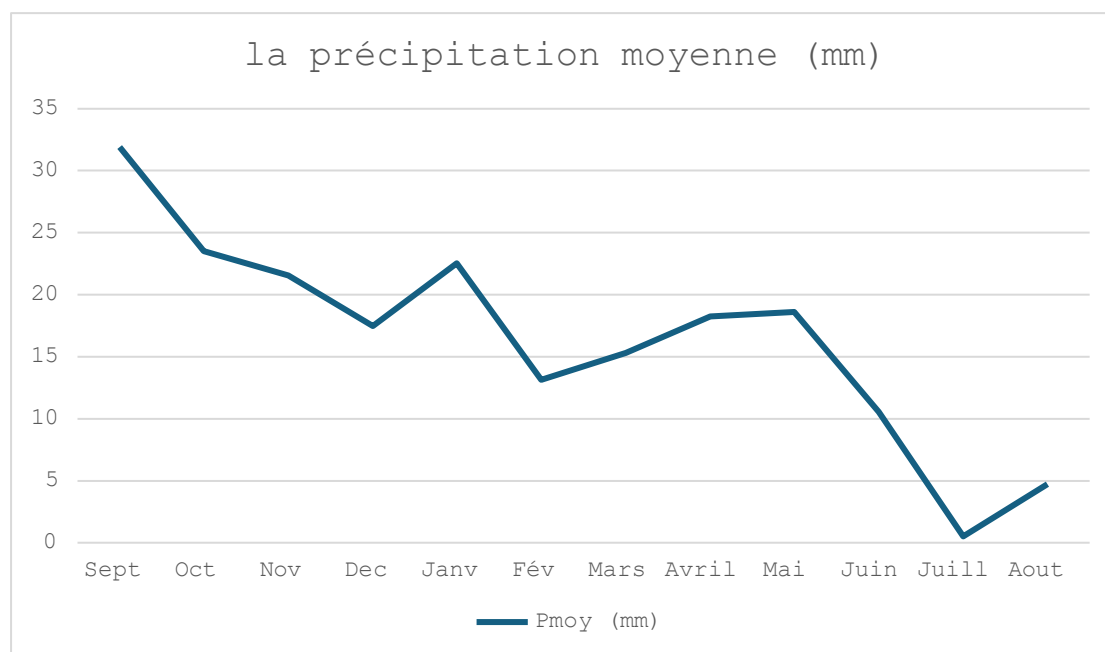


Figure I-9 : Evolution mensuelle moyenne interannuelle de la précipitation de la station de Negrine (1994-2019).

- **Interprétation :**

Les précipitations sont concentrées en automne et en hiver, avec un maximum en septembre. L'été est très sec, surtout en juillet et août. La moyenne annuelle des pluies est de 198 mm, ce qui indique un climat sec avec des pluies faibles et irrégulières.

I.5. Indices agrométéorologiques :

Pour comprendre le climat et son effet sur les plantes, il faut surtout regarder deux choses : la quantité de pluie et la température. Ces éléments jouent un rôle important dans la croissance des cultures et leur adaptation au milieu.

I.5.1. Indice d'aridité de Martonne (1926) :

Il est calculé à partir des moyennes des précipitations et des températures. Déterminer par l'équation suivante :

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

Avec :

- **IA** : indice climatique.
- **P** : précipitation moyenne annuelle (mm).
- **T** : température moyenne annuelle (°C).

Les limites des climats d'après l'indice climatique de Martonne sont données dans le tableau suivant :

Tableau I-7 : Classification du climat selon de Martonne.

Valeur de I_A	Type De Climat	Irrigation
$I_A < 5$	Désertique	Indispensable
$5 < I_A < 10$	Très Sec	Indispensable
$10 < I_A < 20$	Sec	Souvent Indispensable
$20 < I_A < 30$	Relativement Humide	Parfois Utile
$I_A > 30$	Humide	Inutile

Dans notre étude, nous tiendrons compte des éléments suivants :

- P = 198.04mm
- T = 22.80°C

$$I_A = \frac{198.04}{22.80 + 10} = 6.04.$$

- **Interprétation :**

D'après l'indice d'aridité de Martonne, la valeur est entre 5 et 10, ce qui montre que la région a un climat très sec. Cela signifie que l'irrigation est nécessaire pour faire pousser les cultures.

I.5.2. Quotient Ombrothermique d'Emberger (1955) :

L'indice ombrothermique d'Emberger est un outil qui permet d'évaluer le type de climat d'une région en comparant les précipitations avec les températures.

$$Q = \frac{1000 \cdot P}{(M + m)(M - m)/2} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot P}{M^2 - m^2} \quad \dots(I.2)$$

Avec :

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

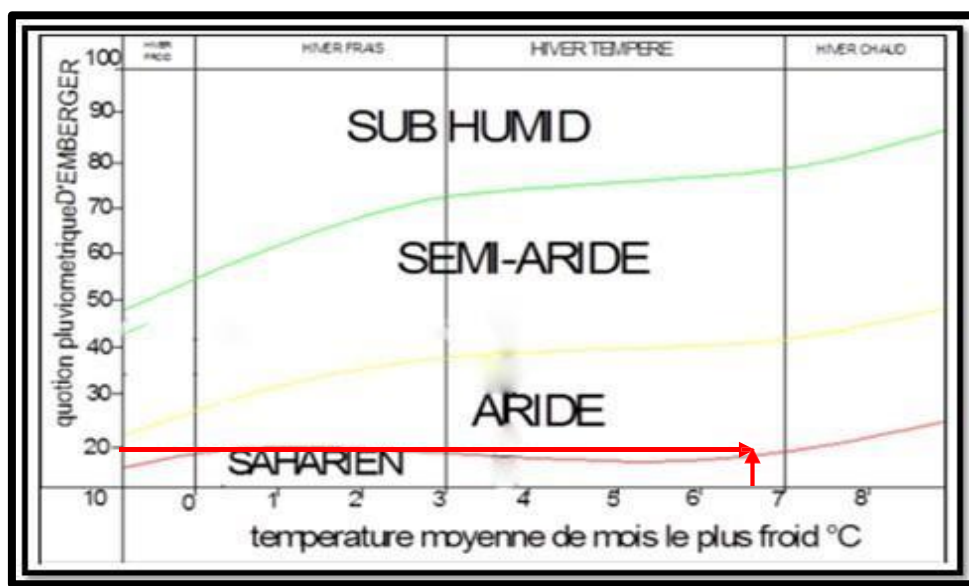


Figure I-10 : Diagramme bioclimatique d'Emberger (Station de Negrine).

$$Q = \frac{2 \cdot 1000 \cdot P}{M^2 - m^2} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 198.04}{(41.52 + 273.15)^2 - (6.79 + 273.5)^2}$$

D'où $Q = 19.36$

Selon le diagramme bioclimatique d'Emberger, et en tenant compte de la valeur de Q et de la température moyenne du mois le plus froid (6.79°C), notre région est classée comme une zone aride.

I.5.3. Climagramme de BAGNOULS et GAUSSEN :

Le diagramme ombrothermique de Gaussen est un outil qui montre comment la température et les pluies varient pendant l'année dans une région. Il utilise une échelle spéciale où les pluies sont mesurées deux fois plus grand que les températures, ce qui permet de repérer facilement les périodes sèches (quand la température dépasse les pluies) et les périodes humides (quand les pluies dépassent la température).

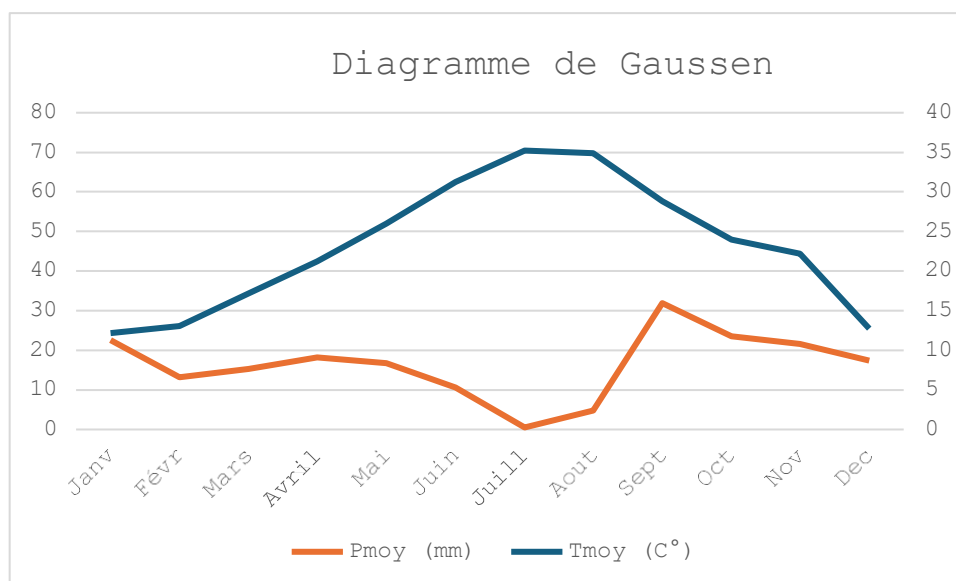


Figure I-11 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen.

• Interprétation :

Pour la station de Negrine à laquelle est rattaché le périmètre de Tarrouma, La région reste sèche toute l'année en raison des températures élevées et des précipitations très faibles.

I.6. Conclusion :

Ce chapitre s'appuie principalement sur l'analyse des données pluviométriques et climatiques relatives au périmètre d'étude.

Nous avons conclu les points suivants concernant le périmètre de Tarrouma :

- Il s'étend sur une vaste zone agricole d'environ 200 000 hectares.
- Il est situé dans une région à climat saharien, caractérisée par :
 - Des températures élevées tout au long de l'année,
 - Des précipitations très faibles (198,04 mm/an),
 - Une humidité faible, accentuant l'aridité du milieu.
- Ces conditions climatiques provoquent une sécheresse fréquente, rendant l'agriculture difficile.
- L'irrigation est donc indispensable pour garantir de bons rendements agricoles.
- La culture des céréales, essentielle pour l'économie agricole locale, dépend de:
 - La bonne gestion des ressources en eau,
 - L'adoption de techniques agricoles adaptées aux conditions climatiques arides.

Chapitre II : Ressource en sol et en eau.

II.1. Introduction :

Ce chapitre portera sur l'évaluation des potentialités pédologiques et hydriques du périmètre, en vue de déterminer leur impact sur la faisabilité et la durabilité des aménagements agricoles.

II.2. Ressources en sol :

L'analyse des sols permet d'identifier les terres les plus propices à l'irrigation et à l'agriculture. Elle fournit également des informations précieuses sur leur fertilité, favorisant le choix de techniques d'irrigation appropriées et une gestion durable des ressources.

II.2.1. Classification des sols :

L'étude repose sur la classification du **C.P.C.S. (Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols)**, édition 1970, de type « génétique », qui s'appuie sur la détermination des unités supérieures : classe, sous-classe, groupe et sous-groupe. Cette classification permet d'identifier les principales contraintes physico-chimiques et hydriques des sols, caractéristiques de chaque unité pédologique.

À une échelle plus détaillée, notamment au niveau parcellaire, la classification peut être affinée jusqu'aux unités inférieures : famille, série et type.

La prospection pédologique, associée aux analyses physico-chimiques des profils dans le périmètre étudié, a conduit à l'identification d'une **classe de sol peu évolué**, subdivisée en deux unités pédologiques homogènes au niveau du sous-groupe :

- Sol peu évolué d'apport éo-alluvial modal
- Sol peu évolué d'apport éo-alluvial faiblement halomorphe

Ces deux unités seront détaillées dans le cadre d'une étude diagnostique qui inclura l'analyse physico-chimique des profils représentatifs, l'interprétation des résultats analytiques, une évaluation des valeurs agronomiques, ainsi que des illustrations photographiques des profils de référence.

II.2.2. Caractéristique morphologique :

Profil N° 1 :

Description du Profil

- | | |
|-------------------------|--|
| ➤ Altitude | -13 |
| ➤ Lithologie : | alluvion fine |
| ➤ Géomorphologie : | plateau saharien |
| ➤ Topographie : pente | 0 - 3% |
| ➤ Charge caillouteuse : | / |
| ➤ Aspet de la surface | parcours dégradée +croule de battanche |
| ➤ Occupation du sol : | terrain nu, |

- Érosion : hydrique
- Drainage interne : faible à moyen
- Drainage externe : faible à médiocre.

Classification Pédologique (C.P.C.S)

- Classe : Sol peu évolués ;
- S/Classe : non climatique ;
- Groupe : d'apport éo-alluvial ;
- S/Groupe : halomorphe ;
- Famille : sur alluvions calcaires

- Type : à texture fine (limono-argileuse). Faiblement salin.
- Série: profond faiblement salin;

Description des horizons :

Les horizons du sol sont définis selon les différentes profondeurs du terrain :

- [0 - 20 cm] Cet horizon est caractérisé par :

Cet horizon est : sec couleur brun **7.5YR 5/3** texture limono-argileuse, structure lamellaire sur **03 cm** puis devient polyédrique fine, matière organique peu décelable, quelques racines fines, faible activité microbienne, pas de charge caillouteuse. Gonflant à l'état humide, poreux moyenne, effervescence à **Hcl**, calcaire diffus, transition non distincte.

- [20 - 72 cm] Cet horizon est caractérisé par :

Cet horizon est : sec couleur brun clair **7.5 YR 6/4** texture limono-argileuse, structure polyédrique fine, matière organique non décelable, quelques racines, activité biologique mauvaise, peu compacte, poreux, moyenne effervescence **Hcl**, calcaire diffus, transition distincte.

- [72 - 120 cm] Cet horizon est caractérisé par :

Cet horizon est : sec couleur brun clair **7.5 YR 6/3** texture argileuse à argileuse à argilo-limoneuse structure polyédrique grossière à angles vifs, gonflant et très plastique à l'état humide matière organique non décelable, activité microbienne nulle, présence des sels

sous forme diffuse, très compacte et dur, moyenne effervescence **Hcl**, passage à un dépôt alluvionnaires fins.

II.2.3. Analyse physico-chimique des sols :

L'analyse physico-chimique en Laboratoire d'analyses des sols et des eaux (**Bneder**) a permis de mieux comprendre les caractéristiques du sol, notamment sa texture et son comportement face à l'eau. Les résultats sont présentés dans le tableau II.1.

Tableau II-1 : L'analyse des profils au laboratoire :

Profil :		2		
Profondeurs (cm)		0-20 cm	20-72 cm	72-120 cm
PH eau		8.1	7.9	8.1
PH Kcl		7.9	7.8	8.0
Gypse (%)		6.45	4	4.8
Calcaire total (%)		16.13	15.23	14.00
Calcaire actif (%)		7.00	6.83	1.29
Carbone (%)		0.78	0.67	0.72
Matière organique (%)		1.35	1.20	1.13
Azote total (%)		0.08	0.09	0.19
C/N		8.66	7.44	3.78
Phosphore (ppm)		2.98	4.39	6.27
Potassium (%)		0.16	0.16	0.15
CEC (meq+/100 grs sol)		21.63	22.14	24.87
Cations échangeables (meq+/100 grs sol)	K+	0.0059	0.0059	0.0052
	Na+	14.83	18.60	17.49
	(Ca++ + Mg++)	47.70+00	63.65+5.96	80.62+1.96
Conductivité électrique (dS/m)		0.65	0.844	1.24
Granulométrie (%)	A	36.66	37.00	50.13
	LF	48.20	49.19	30.19
	LG	7.00	8.10	15.50
	SF	5.45	3.01	2.00
	SG	0.70	0.69	00
Stabilité structurale (mm)		0.45	0.40	0.42

Densité apparent(g/cm^3)	1.45	1.46	1.401.46
Densité réelle (g/cm^3)	1.67	1.68	1.68
Perméabilité k henin cm/h	1.5	2	2.5
Pf 4.2 %	12	12.5	13
PF 3.2 %	19	20	19
PF 2.5 %	24	25	25

• **Interprétation :**

D'après les analyses physico-chimiques des profils, la texture du sol est limono-argileuse, selon la classification du triangle de texture (USDA).

Le sol contient une faible à moyenne quantité de matière organique (environ 1,23 %), ce qui montre qu'il faut ajouter des matières organiques pour améliorer sa fertilité et sa structure.

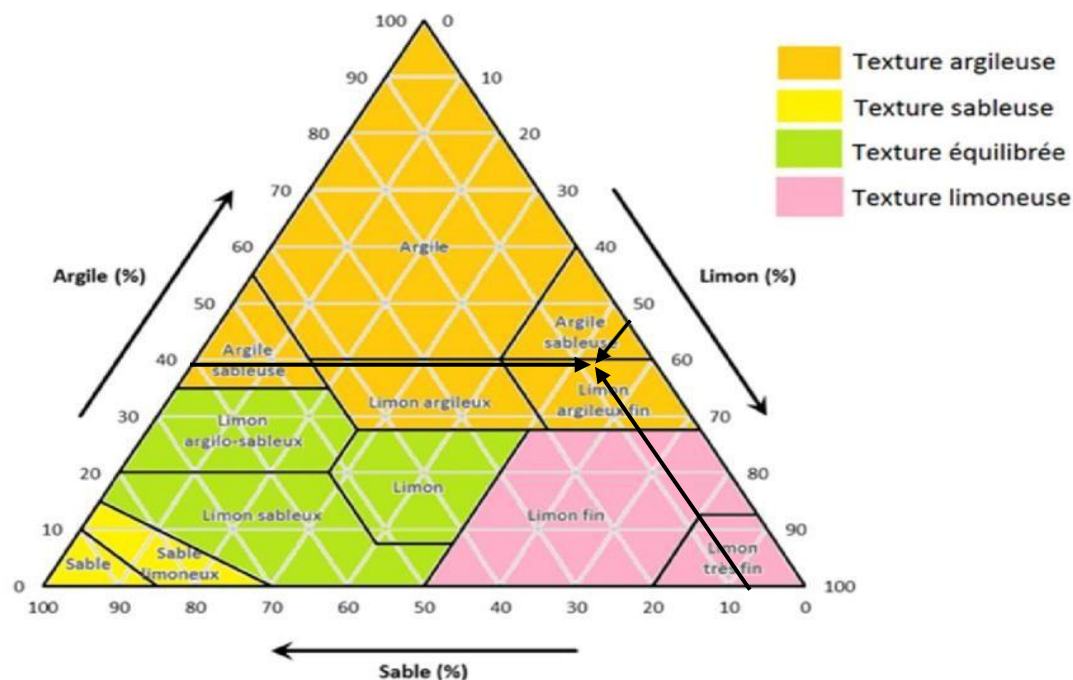


Figure II-1 : Triangle textures des sols étudiés.

II.2.4. Caractéristiques hydrodynamiques des sols :

Tableau II-2 : Caractéristiques hydrodynamiques des sols.

Paramètres	Unité	Valeur moyenne
Texture	-----	Argilo-Sableuse
Point de flétrissement (Hpf)	%	12.5
Densité apparente (Da)	g/cm ³	1.67
Perméabilité Porchet (K)	mm/h	15
la capacité au champ Hcc	%	24.67

Source : (DRE khenchla)

II.2.5. Les aptitudes culturales des sols :

L'aptitude culturale des sols désigne leur capacité à répondre aux besoins physiques, chimiques et biologiques nécessaires à la croissance des plantes. Elle dépend du type de sol, du climat et des exigences des cultures, ce qui permet une utilisation durable et productive des terres agricoles. Cette aptitude peut varier selon les régions et est influencée par les pratiques agricoles comme l'usage de fertilisants, de pesticides, de cultures de couverture et de techniques de gestion de l'eau. Pour maintenir la fertilité des sols et protéger l'environnement, il est essentiel de tenir compte de leur structure, de leur composition chimique, de leur pH et de leur teneur en matière organique. [11]

Tableau II-3 : Les espèces culturales.

N°	Espèces Arboriculture	N°	Espèces : Cultures maraichères	N°	Espèces : Céréales Et Fourrages	N°	Espèces: Cultures industrielles
1	Agrumes	1	Artichaut	1	Luzerne	1	Betterave sucrière
2	Pêcher/Franc	2	Tomate	2	Bersim	2	Cotton
3	Pêcher/Amandier	3	Oignon	3	Sorgho	3	Tournesol
4	Pécher/Prunier	4	Pomme de terre	4	Mais	4	Tabac
5	Abricotier/Franc	5	Carotte	5	Fétuque	5	Lin

6	Abricotier/Prunier	6	Navet	6	Vesce avoine		
7	Olivier	7	Chou-fleur	7	Ray gras		
8	Pommier/Franc	8	Chou pommé	8	Blé dur		
9	Pommier/Doucin	9	Epinard	9	Blé tendre		
10	Pommier/Pa radja	10	Laitue	10	Orge		
11	Poirier/Franc	11	Ail	11	Luzerne		
12	Poirier/Cognassier	12	Melon				
13	Figuier	13	Courgette				

- **Interprétation :**

Les terres présentent un bon potentiel agricole, avec une aptitude culturale favorable pour un large éventail de productions.

- **Arboriculture :**
Le sol convient parfaitement à la culture d'espèces fruitières telles que le pommier, poirier, amandier, prunier, abricotier, olivier, grenadier, vigne, pistachier, coing, ainsi que les agrumes.
- **Cultures maraîchères :**
Les conditions pédoclimatiques sont propices au développement de légumes comme la tomate, la pomme de terre, la carotte, le navet, le chou-fleur, le poivron, l'oignon et l'ail.
- **Cultures industrielles :**
Une bonne aptitude est également observée pour les cultures destinées à la transformation industrielle, notamment la tomate industrielle, la betterave sucrière et le tournesol.
- **Céréales et fourrages :**
Le sol est adapté à la production de blé, orge, luzerne, bersim (trèfle d'Alexandrie) et sorgho, offrant ainsi des possibilités intéressantes pour les cultures céréalières et fourragères.

II.3. Ressources en eau :

L'eau utilisée pour l'irrigation peut provenir de différentes sources, et sa gestion rationnelle est essentielle pour en assurer un usage durable. La quantité d'eau requise varie selon le type de culture, les conditions climatiques et le stade de développement des plantes. Il est donc nécessaire de planifier et de gérer l'irrigation de manière efficace afin d'éviter le gaspillage, d'optimiser les rendements agricoles et de préserver les ressources hydriques.

Tableau II-4 : Caractéristiques principale du forage.

Forage	Altitude (m)	Niveau statique (m)	Niveau dynamique (m)	Débit de forage (L/s)
E	25.6	Artésien	-21	22

Source : (DRE khenchla)

II.3.1. Etude de la qualité de l'eau d'irrigation :

Avant de lancer un projet d'aménagement agricole, il est très important d'analyser la qualité de l'eau d'irrigation. Pour cela, il faut étudier plusieurs facteurs essentiels de manière précise, comme :

- Le pH ;
- Le risque de salinité ;
- Le risque de sodium (exprimé par le Degré d'Adsorption du Sodium ou SAR)
- Les concentrations de carbonate et de bicarbonate de calcium et magnésium ;
- La présence d'anions toxique. [11]

Tableau II-5 : Caractéristiques chimique de l'eau d'irrigation.

Paramètres	Echantillon Du FORAGE
PH à 25°C	7.33
Conductivité (CE) $\mu\text{s/cm}$ à 20°C	1950
Chlorures (Cl-) mg/l	225
Calcium (Ca ²⁺) mg/l	346.96
Magnésium (Mg ²⁺) mg/l	91.8
Sodium (Na ⁺) mg/l	822
Potassium (K ⁺) mg/l	8
Nitrate (NO ₃ ⁻) mg/l	0
Résidu Sec mg/l	3788
Sulfate (SO ₄ ²⁻) mg/l	2500
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻) mg/l	122

Source : (DRE khenchla)

II.3.2. L'évaluation de la qualité de l'eau :

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

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

II.3.2.1 La conductivité électrique :

La classification de l'eau d'irrigation se fait en fonction de sa teneur en sels. Pour la mesurer, on utilise la conductivité électrique (exprimée en mmhos/cm à 25°C), car plus l'eau contient de sels, plus cette conductivité est élevée.

Selon cette mesure, on distingue quatre niveaux de salinité, qui indiquent le risque que l'eau peut poser pour l'irrigation. [12]

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

Classe	Conductivité électrique CE (mmhos/cm) à 25°C	Qualité des eaux	Cultures
C1	$CE \leq 0,25$	Eau de risque faible de salinité.	Pour toutes les cultures.
C2	$0,25 < CE \leq 0,75$	Eau de risque moyen de salinité.	Pour les plantes moyennement tolérantes.
C3	$0,75 < CE \leq 2,25$	Eau de risque élevé de salinité.	Ne convient qu'à des sols bien drainés et des plantes tolérantes.
C4	$CE > 2,25$	Eau de risque très élevé de salinité.	Eau difficilement utilisable.

Avec :

$$\text{Mmhos/cm} = 1 \text{ mS/cm} = 1000 \text{ umhos/cm} = 1000 \text{ us/cm}.$$

Donc la conductivité électrique = 1.950 mmhos/cm.

- **Interprétation :**

Selon cette classification, notre eau appartient à la classe C3, ce qui signifie qu'elle présente un risque élevé de salinité. La limite acceptable de conductivité électrique pour les agrumes dépend des variétés cultivées et des conditions de culture.

II.3.2.2 Coefficient d'adsorption du sodium S.A.R :

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

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

Avec :

Na^+ , Ca^{++} , et Mg^{++} en mg/l.

Le SAR est utile pour savoir si le sodium dans l'eau peut poser problème au sol. Quand le SAR est élevé, il peut abîmer la structure du sol en dispersant les particules d'argile, ce qui réduit l'infiltration de l'eau et empêche les plantes de bien pousser. On distingue quatre niveaux de risque d'alcalinisation selon la valeur du SAR. [13]

Tableau II-7 : Classification des eaux en fonction du SAR.

Classes	S.A.R.	Danger d'alcalinisation
S1	$\text{SAR} \leq 10$	Risque faible
S2	$10 < \text{SAR} \leq 18$	Risque moyen
S3	$18 < \text{SAR} \leq 26$	Risque élevé
S4	$\text{SAR} > 26$	Risque très élevé

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\frac{\sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}}{2}} = \frac{822 \text{ (mg/l)}}{\frac{\sqrt{346.96 \text{ (mg/l)} + 91.8 \text{ (mg/l)}}}{2}} = \frac{14.23 \text{ (méq/l)}}{\frac{\sqrt{17.35 \text{ (méq/l)} + 7.56 \text{ (méq/l)}}}{2}}$$

$$\text{SAR} = 4.12$$

• Interprétation :

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

Dans notre cas **SAR=4.12** et **CE= 1950 $\mu\text{s}/\text{cm}$** , la classe de l'eau est **C3S1**.

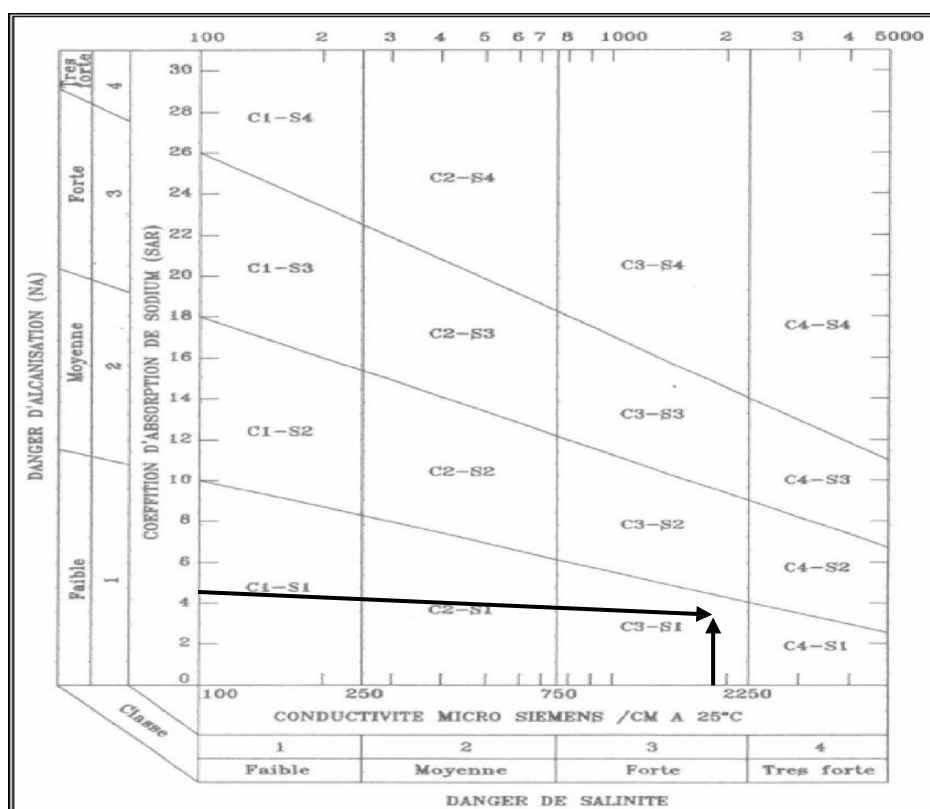


Figure II-2 : Diagramme de classification de l'eau d'irrigation.

II.3.3. Calcul de la pluie de projet :

II.3.3.1 Choix de la station :

Tableau II-8 : Caractéristique de la station.

Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)	Période
Negrine	34° 29' 8" N	7° 31' 19" E	348	1995 - 2024

Tableau II-9 : Précipitations moyennes mensuelles couvrant la période de (1995 à 2024).

Années	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuel
1995	24.64	38.84	11.38	6.34	9.4	8.04	13.4	8.18	10.91	8.77	0	5.37	145.27
1996	78.87	21.71	26.16	20.78	33.82	23.78	23.6	16.58	20.55	8.95	0	6.99	281.79
1997	33.99	10.7	17.82	17.97	39.88	10.84	7.81	21.24	12.89	12.63	2.21	5.34	193.32
1998	76.05	35.92	38.3	14.87	12.91	13	13.34	28.36	12.25	15.55	0	4.98	265.53
1999	21.13	36.34	27.39	8.04	44.4	10.11	11.88	9.02	18.6	10.87	1.23	0	199.01
2000	24.8	21.93	40.72	27.34	5.59	7.53	9.38	7.83	34.66	8.07	0	0	187.85
2001	15.96	16.12	11.9	13.99	29.42	8.26	10.48	6.23	24.86	0	0	5.22	142.44
2002	20.88	10.48	12.68	19.48	12.98	10.63	8.19	5.12	21.42	9.73	2.63	13.54	147.76
2003	16.57	16.61	43.82	18.05	90.79	18.08	12.62	31.05	21.23	5.99	0	0	274.81

2004	33.17	39.77	26.72	53.14	15.69	11	29.26	16.8	13.03	14.25	0	7.26	260.09
2005	25.41	18.44	45.53	35.13	7.84	9.36	13.8	10.6	13.08	16.2	0	5.78	201.17
2006	46.62	19.95	18.79	29.06	25.89	15.16	0	19.77	17.77	9.66	0	5.7	208.37
2007	36.71	18.49	14.28	37.61	13.54	17.51	20.22	41.08	12.88	8.21	0	4.76	225.29
2008	25.71	14.4	8.17	14.45	12.03	6.91	10.24	12.9	13.07	8.81	1.94	0	128.63
2009	39.48	29.42	15.45	17.46	120.05	8.57	15.45	20.62	17.93	6.07	0	5.34	295.84
2010	65.08	11.7	8.91	8.35	39.19	10.02	9.93	33.23	15.87	14.05	0	3.61	219.94
2011	27.32	31.52	27.77	15.79	8.31	15.29	26.79	22.53	15.02	7.83	0	4.83	203
2012	16.41	26.21	12.49	11.01	26.54	13.24	25.23	22.43	11.79	5.98	0	0	171.33
2013	28.45	24.34	18.2	6.48	18.64	10.56	14.32	20.98	14.04	10.33	0	10.23	176.57
2014	39.6	26.62	20.07	18.52	12.84	15.33	18.63	13	15.01	15.92	0	2.45	197.99
2015	26.11	20.7	29.15	12.91	15.33	30.59	16.39	8.32	11.81	13.82	0	15.05	200.18
2016	29.11	23.02	13.78	7.53	12	10.93	12.84	15.33	25.55	9.08	1.98	0	161.15
2017	35.83	21.75	12.9	29.64	8.96	13.55	12.5	37.92	16.25	10.88	0	0	200.18
2018	25.94	49.37	38.46	9.34	10.25	20.45	11.8	18.06	28.38	10.4	2.08	8.7	233.23
2019	17.62	42.58	17.33	7.31	11.8	13.62	22.64	18.29	25.45	7.66	2.35	10.45	197.1
2020	31.24	22.91	25.73	15.49	9.35	7.6	25.14	15.89	20.12	14.21	1.03	0	188.71
2021	34.37	16.79	13.39	14.67	10.64	15.74	7.86	11.84	16.53	11.38	0	0	153.21
2022	20.41	15.86	16.52	6.35	6.54	9.89	37.55	16.09	16.27	13.32	0	3.92	162.72
2023	25.89	12.84	12.31	11.63	5.31	13.97	7.27	14.96	42.84	18.46	0	5.4	170.88
2024	13.9	10.28	19.83	15.49	6.47	14.05	10.56	23.23	17.21	10.29	0	6.42	147.73
Pmoy	31.91	23.52	21.53	17.47	22.55	13.12	15.30	18.25	18.58	10.58	0.52	4.71	198.04

Source : (ANRH 2025)

Cette série de pluies annuelles a les caractéristiques statistiques suivantes :

Tableau II-10 : Caractéristiques de la série pluviométrique.

Moyenne	198 mm
Ecart type	43.9
CV	0.222
P_{min}	129 mm
P_{max}	296 mm

II.3.3.2 Etude de l'homogénéité de la série pluviométrique :

L'étude de l'homogénéité des données de pluie permet de vérifier qu'elles sont cohérentes et comparables au fil du temps, sans interruption ni erreur causée par des changements de méthode ou de station. Cela rend les analyses climatiques et

hydrologiques plus fiables. Dans notre étude, nous utilisons le test de Mood pour faire cette vérification.[10]

Tableau II-11 : les étapes d'homogénéisation de la série.

Pmoy	Signes	Pmoy	Signes	Pmoy	Signes
145.27	–	201.17	+	200.18	+
281.79	+	208.37	+	161.15	–
193.32	–	225.29	+	200.18	+
265.53	+	128.63	–	233.23	+
199.01	+	295.84	+	197.10	–
187.85	–	219.94	+	188.71	–
142.44	–	203.00	+	153.21	–
147.76	–	171.33	–	162.72	–
274.81	+	176.57	–	170.88	–
260.09	+	197.99	+	147.73	–

II.3.3.3 Statistique de test de la médiane :

La série de données contient 30 années, ce qui correspond à un nombre pair. Dans ce cas, la médiane est déterminée en faisant la moyenne des deux valeurs situées aux rangs $N/2$ et $(N/2) + 1$, c'est-à-dire aux rangs 15 et 16.

Après avoir trié la série dans l'ordre croissant, nous avons identifié les deux valeurs suivantes :

- **Rang 15 :** 193,32
- **Rang 16 :** 201,77

La médiane (Me) est donc calculée comme suit :

$$Me = (193,32 + 201,77) / 2 = 197,55$$

La médiane de cette série est de **197,55 mm**, obtenue en prenant la moyenne des deux valeurs centrales (rangs 15 et 16), conformément à la méthode utilisée pour les séries de taille paire.

$$NOBS > \frac{1}{2} ((N + 1) - U_{(1-\alpha)/2} * \sqrt{N - 1}) \dots (II.2)$$

$$T_{OBS} < 3.3 (\log(N+1))$$

Pour cette série de 30 années ($N = 30$), nous avons analysé son homogénéité à l'aide des critères basés sur les séquences de signes autour de la médiane. Le nombre total de séquences observées (NOBS) et la longueur maximale d'une séquence (TOBS) ont été comparés aux valeurs théoriques (N_{the} et T_{the}) calculées pour un niveau de confiance de 95 %.

Où la variable normale réduite $U_{1-\alpha/2}$ vaut 1,96.

Dans notre cas, **NOBS = 19** et **TOBS = 5**.

Tandis que les valeurs théoriques sont **Nthe = 14,7** et **Tthe = 6,7**.
Puisque **NOBS > Nthe** et **TOBS < Tthe**, les deux conditions sont remplies.

II.4. Choix des lois de probabilités :

Les lois les plus utilisées pour modéliser les données de pluviométrie annuelle sont :

1. La loi normale (ou loi de Gauss),
2. La loi log-normale (ou loi de Galton).

Ces deux lois de probabilité continues sont définies par deux paramètres :

La moyenne (μ) et l'écart type (σ).

Dans le cas de la loi log-normale, on utilise le logarithme de la moyenne et de l'écart type à la place des valeurs directes.

Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel HYFRAN

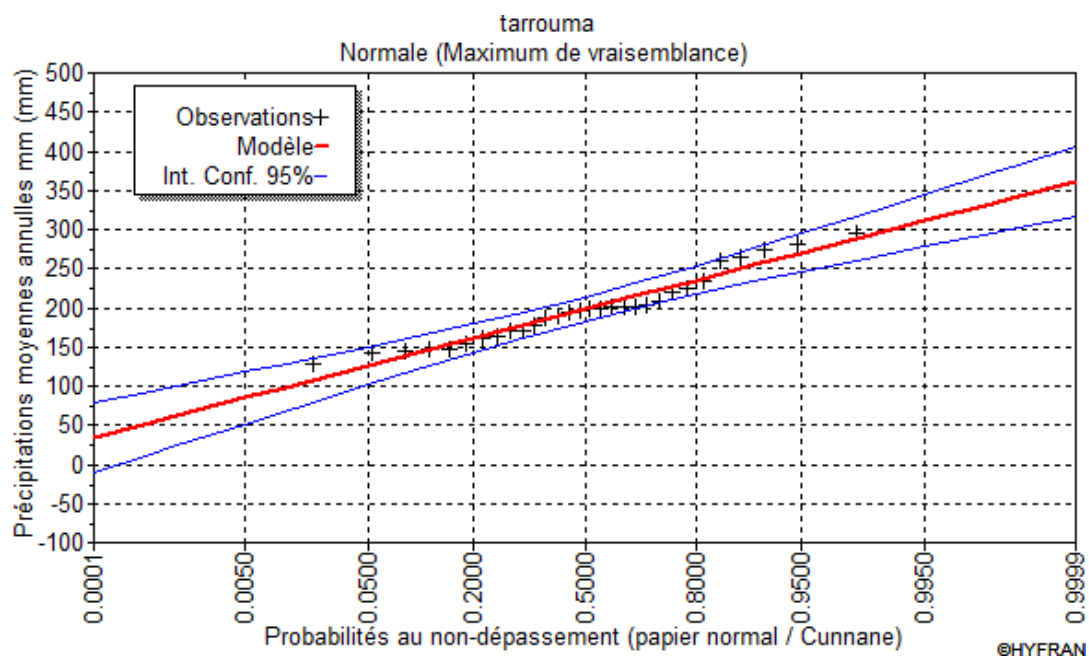


Figure II-3 : Ajustement des pluies annuelles aux lois normal.

Résultat :

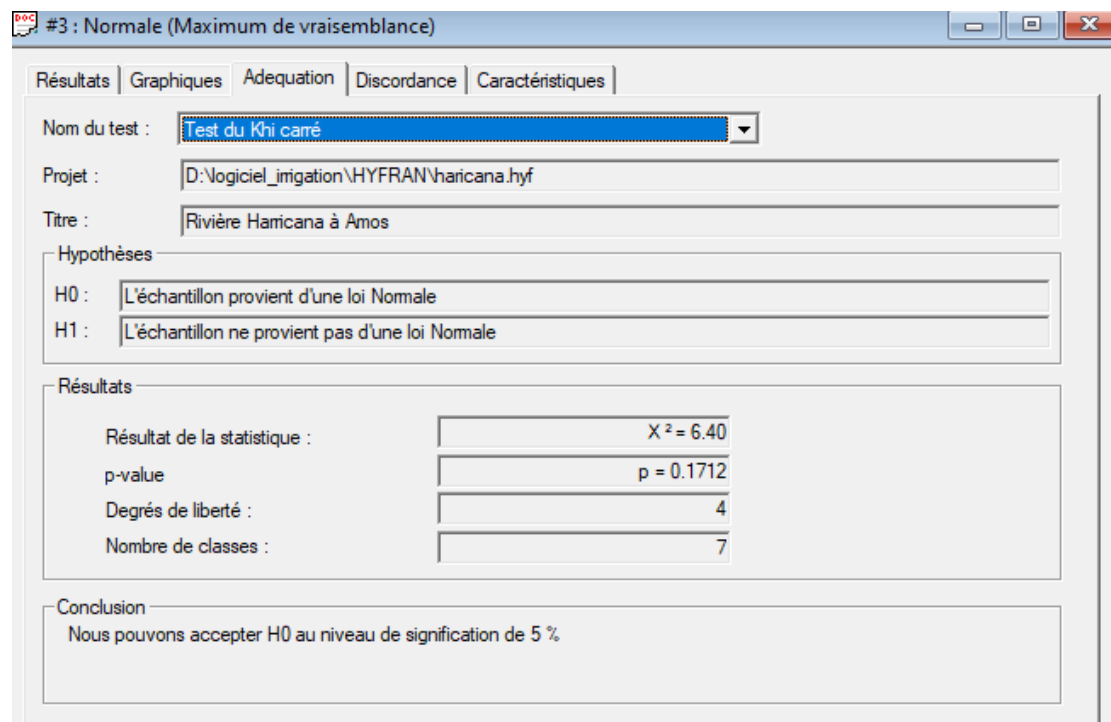


Figure II-4 : Résultat d'ajustement des pluies annuelles aux lois normal.

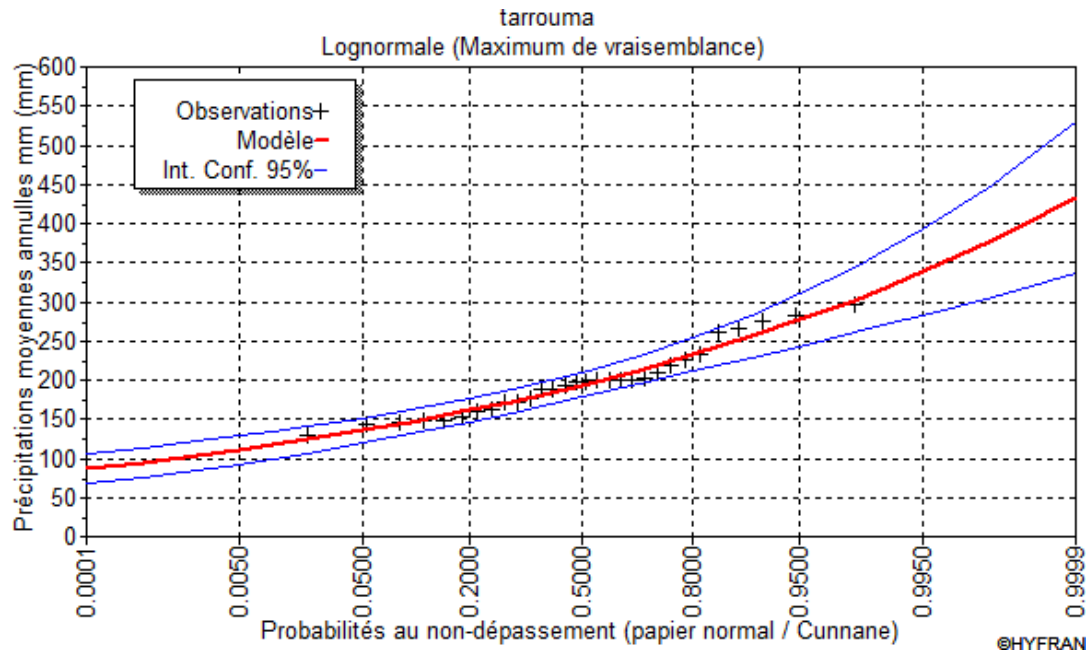


Figure II-5 : Ajustement des pluies annuelles aux lois log normal.

Résultat :

Figure II-6 : Résultat d’ajustement des pluies annuelles aux lois log normal.

II.4.1. Test de validité d’un ajustement :

Après l’ajustement des données à une loi de probabilité, il est important d’évaluer la qualité de cet ajustement afin de sélectionner le modèle le plus adapté.

Dans notre étude, le test du Khi carré (χ^2) a été utilisé à cette fin, conformément à la méthode décrite par Touaibia, B. (2004) (voir Annexe 1).

Une loi est considérée comme adéquate avec un seuil d’erreur de $\alpha=0.05$ si et seulement si :

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

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

Loi normale	Loi log-normale
$\chi^2_{\text{calculé}} = 6.40$	$\chi^2_{\text{calculé}} = 9.20$
Degrés de liberté = 4	
$\chi^2_{\text{théorique}} = 9.488$	

C’est la loi normale qui convient le mieux à notre série.

II.4.2. Détermination de l'année de calcul :

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

Tableau II-13 : Résultat de l'ajustement.

T	q	Xt	Ecact-type	Intervalle de confiance
2	0.5000	198	8.02	182 - 214
1.25	0.2000	161	9.38	143 - 179

La probabilité permettant d'assurer l'irrigation est donnée souvent pour la fréquence 80 %.

$$P_{\text{moy}80\% \text{ de chaque mois}} = P_{\text{moy de chaque mois}} * \frac{P_{\text{théorique}(80\%) \text{ annuelle}}}{P_{\text{théorique}(50\%) \text{ annuelle}}}$$

$$\frac{P_{\text{théorique}(80\%) \text{ annuelle}}}{P_{\text{théorique}(50\%) \text{ annuelle}}} = \frac{161}{198} = 0.81$$

$$P_{\text{moy}80\% \text{ de chaque mois}} = P_{\text{moy de chaque mois}} * 0.81$$

Tableau II-14 : calcul des pluies mensuelles pour l'année sèche (freq = 80 %)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Pmoy (mm)	31.91	23.52	21.53	17.47	22.54	13.12	15.3	18.25	18.6	10.57	0.51	4.71
Pmoy80% (mm)	25.85	19.05	17.44	14.15	18.26	10.63	12.39	14.78	15.07	8.56	0.41	3.82

II.5. Conclusion :

La caractérisation des ressources en sol et en eau constitue une étape fondamentale pour assurer une gestion rationnelle du périmètre de Tarrouma.

L'analyse pédologique a mis en évidence la présence de sols peu évolués, présentant des caractéristiques physico-chimiques globalement favorables, influençant positivement leur aptitude à la culture ainsi que leur capacité de rétention en eau.

Concernant les ressources hydriques, l'étude hydrologique a souligné une pluviométrie insuffisante et irrégulière. En l'absence de ressources en eau superficielles, l'alimentation du périmètre reposera sur des forages situés à proximité de la zone d'étude.

Ces eaux souterraines présentent une qualité satisfaisante, avec une salinité modérée, compatible avec les usages agricoles projetés.

Chapitre III : : Calcul des besoins en eau des cultures

III.1. Introduction :

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

III.2. Les besoins en eau d'irrigation :

Les besoins en eau des cultures désignent la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les exigences hydriques des plantes, assurant ainsi leur croissance, leur développement et un rendement optimal (Allen et al., 1998 ; Doorenbos et Pruitt, 1977).

Le bilan hydrique d'une culture se calcule comme la différence entre l'évapotranspiration maximale (ETM), qui dépend du climat et des caractéristiques de la plante, et les précipitations effectives.

Pour déterminer la quantité d'eau à apporter par irrigation, ce bilan est établi périodiquement, selon la formule :

$$Bi = ETM - (Pe_{eff} + K \cdot RFU_{i-1}) \dots (III.1)$$

- **ETM** : est l'évapotranspiration potentielle de référence en mm/mois.
- **Pe_{eff}** : représente la pluie efficace en mm.
- **RFU** : est la réserve du sol facilement utilisable disponible au début de la période.
- **K** : est un coefficient généralement égal à 1/2 ou 1/3.

La réserve facilement utilisable (RFU) est calculée en utilisant la formule :

$$RFU = Y (H_{cc} - H_{pf}) \cdot Da \cdot Z \dots (III.2)$$

- **Y** est le degré de tarissement,
- **Da** est la densité apparente (1.67),
- **Z** est la profondeur d'enracinement en mm,
- **H_{cc}** est l'humidité à la capacité au champ (dans ce cas, 24.64 %).
- **H_{pf}** est l'humidité au point de flétrissement (dans ce cas, 12.5 %).

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

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

$$R_s = K \times RFU \dots (III.3)$$

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

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

L'irrigation devient nécessaire dès que le bilan hydrique (B_i) est supérieur à zéro. Ces calculs permettent aux agriculteurs de planifier l'irrigation avec précision, optimisant ainsi les rendements tout en réduisant la consommation d'eau.

- $P_{eff} = A \cdot \text{Pluie}$ et $A = 0,8$ à $0,9$. (Pour notre cas on va prendre $A = 0,81$).

III.2.1. Calcul de l'évapotranspiration :

L'évaporation du sol et la transpiration des plantes sont deux mécanismes distincts, mais souvent considérés ensemble sous le terme d'évapotranspiration. Ce processus global représente l'ensemble de l'eau utilisée par la plante pour maintenir un bon état hydrique et éviter toute carence en eau [8].

L'évapotranspiration se divise en trois catégories :

- L'évapotranspiration de référence (ET_0).
- L'évapotranspiration potentielle (ETP).
- L'évapotranspiration réelle (ETR).

III.2.2. Calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_0) :

L' ET_0 correspond à la perte maximale d'eau par évaporation et transpiration, depuis une surface végétale uniforme, bien irriguée et en pleine croissance, dans des conditions climatiques données. Elle s'exprime en millimètres par jour.

Deux approches permettent d'estimer l' ET_0 :

- Les méthodes directes, utilisant des instruments de mesure ;
- Les méthodes indirectes, basées sur des formules empiriques.

Parmi ces dernières, la formule de Penman-Monteith est la plus répandue, malgré ses exigences en données climatiques. D'autres méthodes, comme celles de Thornthwaite, Blaney-Criddle, ou la méthode de Doorenbos et Pruitt (recommandée par la FAO), sont également utilisées.

Bien que les mesures directes soient difficiles à mettre en œuvre, l' ET_0 peut être estimée de façon fiable à l'aide de ces formules [7].

➤ **Formule Modifiée de Penman_Monteith :**

En 1948, Penman et Monteith ont élaboré une méthode de calcul de l'évapotranspiration d'une surface libre en combinant le bilan énergétique et le transfert de masse. Leur approche a conduit à une équation permettant d'estimer l'évapotranspiration à partir de données climatiques telles que l'ensoleillement, la température, l'humidité et la vitesse du vent. Depuis, la formule modifiée de Penman-Monteith est devenue la référence, largement utilisée et recommandée par la FAO [7].

La formule :

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{moy} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \dots (III. 4)$$

Avec :

- **ET_0** : Évapotranspiration de référence [millimètres par jour],
- **R_n** : Rayonnement net à la surface de la culture [mégajoules par mètre carré par jour],
- **G** : Flux de chaleur volumique dans le sol [mégajoules par mètre carré par jour],
- **T** : Température moyenne quotidienne de l'air à une hauteur de 2 mètres [degrés Celsius],
- **u_2** : Vitesse du vent à une hauteur de 2 mètres [mètres par seconde],
- **e_s** : Pression de vapeur saturante [kilopascals],
- **e_a** : Pression de vapeur réelle [kilopascals],
- **$e_s - e_a$** : Déficit de pression de vapeur saturante [kilopascals],
- **D** : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante [kilopascals par degré Celsius],
- **g** : Constante psychrométrique [kilopascals par degré Celsius].

Pour effectuer des calculs précis, nous avons utilisé le logiciel CROPWAT, en y intégrant les données climatiques mensuelles fournies par la station météorologique de Negrine.

Les données utilisées incluaient :

- Les températures mensuelles minimales et maximales (°C),
- L'humidité relative de l'air (%),
- Le nombre d'heures d'ensoleillement par jour,
- Et la vitesse du vent, exprimée en mètres par seconde.

À l'aide du logiciel **CROPWAT 8.0**, nous avons estimé l'évapotranspiration de référence (**ET₀**) pour la station de Negrine.

Les résultats, présentés dans le rapport final, nous ont permis de déterminer avec précision le taux d'évapotranspiration propre à cette zone, un paramètre essentiel pour la gestion efficace de l'eau et la planification de l'irrigation agricole.

Tableau III-1 : Evapotranspiration de référence ET₀ calculée par le logiciel COPWAT.

Mois	T min	T max	Humidité	Vent	Insolation	Ray.	ET ₀
	°C	°C	%	m/s	heures	MJ/m ² /j	mm/mois
Janvier	6.79	17.56	55.54	3.38	7.8	11.9	83.81
Février	7.79	18.61	48.95	3.72	8.7	15.3	98.46
Mars	11.27	23.14	42.85	4.34	9.4	19.4	162.31
Avril	15.10	27.38	39.04	4.25	10.3	23.4	205.04
Mai	19.63	32.37	33.05	4.41	11.3	26.4	291.71
Juin	24.6	37.83	28.03	4.29	12.2	28.1	315.53
Juillet	28.19	41.52	25.18	3.93	13.1	29.1	347.93
Aout	27.82	40.54	28.45	3.58	12.4	26.8	316.09
Septembre	23.01	34.61	39.6	3.55	10.2	21.2	227.55
Octobre	18.33	29.55	46.2	3.27	9.6	17.2	165.91
Novembre	12.25	32.09	53.11	3.59	7.8	12.4	146.26
Décembre	7.77	17.70	59.04	3.44	7.2	10.6	79.77
Moyenne	16.86	28.66	41.59	3.81	10.2	20.1	2420.57

- **Interprétation :**

L'analyse des données climatiques montre que l'évapotranspiration de référence (ET₀) atteint ses valeurs les plus élevées durant la saison estivale, avec un pic de 347,93 mm/mois en juillet. Cette augmentation est directement liée à des températures maximales élevées (jusqu'à 41,52 °C), une faible humidité relative (25,18 %) et une forte insolation (13,1 heures par jour).

Ces conditions climatiques accentuent la demande en eau des cultures, ce qui rend l'irrigation particulièrement nécessaire durant les mois de mai à août, période durant laquelle l'ET₀ dépasse les 290 mm/mois. À l'inverse, les mois d'hiver (décembre à février) enregistrent une ET₀ nettement plus basse (entre 79,77 et 98,46 mm/mois), traduisant une moindre évaporation et des besoins hydriques plus faibles.

III.2.3. Calcul de la pluie efficace :

La pluie efficace correspond à la portion des précipitations réellement utilisable par la culture, obtenue en soustrayant l'évapotranspiration aux précipitations totales. Une fois au sol, cette eau se répartit entre l'infiltration et l'écoulement de surface. Plusieurs méthodes permettent d'estimer la pluie efficace ; dans notre étude, nous avons retenu

la méthode du pourcentage fixe, en considérant 80 % des précipitations comme efficaces.

$$\text{Pluies efficaces (mm/mois)} = A. \text{ Pluies totales 80\% (mm/mois)} \dots (\text{III.5})$$

Avec :

- **A** : coefficient de pertes généralement égal à 0.8.

Si la quantité de pluie efficace est inférieure à 2 mm, elle est considérée comme étant nulle.

Tableau III-2 : Calcul des pluies efficaces.

Mois :	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Pmoy80% (mm) :	25.85	19.05	17.44	14.15	18.26	10.63	12.39	14.78	15.07	8.56	0.41	3.82
Peff	20.68	15.24	13.95	11.32	14.61	8.5	9.91	11.82	12.06	6.85	0.33	3.06

III.2.4. Calcul de l'évapotranspiration maximale (ETM) :

L'évapotranspiration maximale (ETM) représente la quantité maximale d'eau perdue par une culture par évaporation et transpiration. Elle dépend principalement du stade de croissance de la plante une culture peu développée perd moins d'eau qu'une culture à maturité ainsi que des conditions climatiques et des caractéristiques du sol. L'estimation de l'ETM se fait à l'aide de la formule suivant :

$$\text{ETM} = K_c \times E_{T0} \dots (\text{III.6})$$

Avec :

- **ETM** : Évapotranspiration maximale, représentant les besoins en eau de la culture (exprimée en mm),
- **K_c** : le coefficient cultural spécifique à la culture considérée,
- **E_{T0}** : Évapotranspiration de référence (millimètres par jour).

III.2.5. Assolement des Cultures (Choix des Cultures) :

La production agricole en milieu aride repose sur des choix judicieux permettant de s'adapter aux contraintes liées au climat sec et à la disponibilité limitée en eau. Les cultures maraîchères et céréalières irriguées jouent un rôle fondamental, car elles fournissent des denrées alimentaires de base tout en présentant une certaine tolérance

au stress hydrique.

Dans la zone étudiée, les cultures les mieux adaptées aux conditions pédoclimatiques locales sont les grandes cultures comme le blé et l'orge, l'arboriculture rustique telle que l'olivier, ainsi que diverses cultures maraîchères.

Tableau III-3 : Répartition des surfaces agricoles selon l'assolement proposé.

Culture	Céréales (%)	Maraichage (%)	Arboriculture (%)	Fourragères (%)	Total (%)
Pourcentage	45	25	20	10	100

En agronomie, l'assolement désigne l'organisation et la répartition des cultures sur les différentes parcelles d'une exploitation au cours d'une saison agricole donnée.

Tableau III-4 : Assolements des cultures.

Assolement 1	Blé	Pomme de terre	Oignon	Olivier	Sorgho
Assolement 2	Orge grain	Ail	Betterave	Olivier	Avoine

III.2.5.1 Estimation des coefficients cultureux (Kc) :

D'après le bulletin Irrigation et Drainage (FAO, 2003), les coefficients cultureux (Kc) de chaque culture ont été établis en tenant compte de plusieurs paramètres, notamment les stades de développement des plantes, la vitesse du vent et l'humidité relative moyenne de l'air dans la zone étudiée.

Ces coefficients sont essentiels pour estimer avec précision l'évapotranspiration maximale des cultures, ce qui permet d'optimiser les pratiques d'irrigation et de drainage. Grâce à ces données, les agriculteurs peuvent ajuster leurs apports en eau afin d'améliorer les rendements tout en réduisant les pertes hydriques [9].

Cette évaluation est essentielle pour optimiser la gestion de l'irrigation, en prévenant à la fois les situations de stress hydrique et les pertes d'eau. Le tableau suivant regroupe les coefficients cultureux des cultures retenues.

Tableau III-5 : Coefficients culturaux (Kc) des cultures sélectionnées.

Culture	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Blé	-	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6	1	0.9	0.87	0.23	-	-
Orge grain	-	-	0.3	0.4	0.7	0.85	0.95	0.75	0.55	0.4	-	-
Pomme de terre (AS)	0.5	0.7	0.95	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-
Oignon	-	0.5	0.75	0.95	0.9	0.7	-	-	-	-	-	-
Ail	-	0.5	0.75	0.85	0.9	0.7	0.55	-	-	-	-	-
Betterave	-	-	0.4	0.5	0.7	0.8	0.95	0.6	-	-	-	-
Olivier	0.75	0.75	0.75	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.75	0.75
Amandier	0.55	0.55	0.5	0.5	0.55	0.55	0.55	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Sorgho	-	-	-	-	-	-	0.4	0.6	0.8	0.6	-	-
Avoine	-	0.3	0.40	0.70	0.85	0.95	1.05	1.00	0.80	0.25	-	-

III.3. Estimation des besoins en eau des cultures choisies :

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

III.3.1. Les besoins de lessivage :

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

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

$$LR = \frac{Ce_{iw}}{5C_{ees} - Ce_{iw}} \dots \dots \dots (III.7)$$

Avec :

- **LR** : fraction de lessivage,

- **Ce_{iw}** : conductivité électrique d'eau d'irrigation, pour notre cas : 1.95 mmohms/cm,
- **Ce_{es}** : conductivité électrique du sol qui provoque une chute de rendement de 10%.

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

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

$$V_{less} = \frac{ETM \times LR}{1 - LR} \dots\dots\dots(III.8)$$

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

Tableau III-6 : Volumes de lessivage pour chaque culture

Mois	Blé	Orge grain	Pomme de terre	Olivier	Ail	Oignon	Sorgho	Avoine	Betterave
Sep			25.80	9.00					
Oct	2.93		26.33	8.17	31.72	31.72		2.84	
Nov	3.44	1.85	31.50	7.32	41.94	41.94		3.35	8.39
Dec	2.81	1.35	13.57	2.34	25.92	28.98		3.20	5.72
Jan	2.96	2.48		2.71	28.84	28.84		4.08	8.41
Fev	3.48	3.54		3.02	26.35	26.35		5.35	11.29
Mars	9.57	6.52		7.13	34.14		3.83	9.75	22.10
Avr	10.87	6.50		7.62			7.24	11.72	19.10
Mai	13.94	6.33		8.19			12.82	12.44	8.39
Juin	4.27	5.34		9.64			11.16	4.51	
Juill				12.82					
Aout				9.64					

III.3.1.1 Estimation des besoins en eau des céréales :

Tableau III-7 : 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)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55		0.00			0	0
Oct	23.52	15.24	165.91	0.1	1.35	0	0.3	49.77	34.53
Nov	21.53	13.95	146.26	0.3	4.06	0	0.4	58.50	44.55
Dec	17.47	11.32	79.77	0.5	6.77	0	0.6	47.86	36.54
Jan	22.54	14.61	83.81	0.6	8.13	0	0.6	50.29	35.68
Fev	13.12	8.5	98.46	0.6	8.13	0	0.6	59.08	50.58
Mars	15.3	9.91	162.31	0.6	8.13	0	1	162.31	152.40
Avr	18.25	11.82	205.04	0.6	8.13	0	0.9	184.54	172.72
Mai	18.6	12.06	271.91	0.6	8.13	0	0.87	236.56	224.50
Juin	10.57	6.85	315.53	0.6	8.13	0	0.23	72.57	65.72
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

Tableau III-8 : 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)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55		0			0	0
Oct	23.52	15.24	165.91		0	0		0	0
Nov	21.53	13.95	146.26	0.3	4.06	0	0.3	43.88	29.93
Dec	17.47	11.32	79.77	0.5	6.77	0	0.4	31.91	20.59
Jan	22.54	14.61	83.81	0.6	8.13	0	0.7	58.67	44.06
Fev	13.12	8.5	98.46	0.6	8.13	0	0.85	83.69	75.19
Mars	15.3	9.91	162.31	0.6	8.13	0	0.95	154.19	144.28
Avr	18.25	11.82	205.04	0.6	8.13	0	0.75	153.78	141.96
Mai	18.6	12.06	271.91	0.6	8.13	0	0.55	149.55	137.49
Juin	10.57	6.85	315.53	0.6	8.13	0	0.4	126.21	119.36
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

III.3.1.2 Estimation des besoins en eau des maraîchages :

Tableau III-9 : Calcul des besoins en eau pour la pomme de terre.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55	0.2	2.71		0.5	113.78	93.10
Oct	23.52	15.24	165.91	0.4	5.42	0	0.7	116.14	100.90
Nov	21.53	13.95	146.26	0.5	6.77	0	0.95	138.95	125.00
Dec	17.47	11.32	79.77	0.5	6.77	0	0.75	59.83	48.51
Jan	22.54	14.61	83.81		0	0		0	0
Fev	13.12	8.5	98.46		0	0		0	0
Mars	15.3	9.91	162.31		0	0		0	0
Avr	18.25	11.82	205.04		0	0		0	0
Mai	18.6	12.06	271.91		0	0		0	0
Juin	10.57	6.85	315.53		0	0		0	0
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

Tableau III-10 : Calcul des besoins en eau pour la betterave.

Mois	Pmoy (mm)	Peff (mm)	ET0 (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	Kc	ETM (mm)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55		0			0	0
Oct	23.52	15.24	165.91		0	0		0	0
Nov	21.53	13.95	146.26	0.5	6.77	0	0.4	58.50	44.55
Dec	17.47	11.32	79.77	0.9	12.19	0	0.5	39.89	28.57
Jan	22.54	14.61	83.81	0.9	12.19	0	0.7	58.67	44.06
Fev	13.12	8.5	98.46	0.95	12.87	0	0.8	78.77	70.27
Mars	15.3	9.91	162.31	0.9	12.19	0	0.95	154.19	144.28
Avr	18.25	11.82	205.04	0.7	9.48	0	0.65	133.28	121.46
Mai	18.6	12.06	271.91		0	0		0	0
Juin	10.57	6.85	315.53		0	0		0	0
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

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

Mois	Pmoy (mm)	Pe _{ff} (mm)	ET ₀ (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	K _c	ETM (mm)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55		0			0.00	0
Oct	23.52	15.24	165.91	0.2	2.71	0	0.5	82.96	67.72
Nov	21.53	13.95	146.26	0.4	5.42	0	0.75	109.70	95.75
Dec	17.47	11.32	79.77	0.4	5.42	0	0.95	75.78	64.46
Jan	22.54	14.61	83.81	0.4	5.42	0	0.9	75.43	60.82
Fev	13.12	8.5	98.46	0.4	5.42	0	0.7	68.92	60.42
Mars	15.3	9.91	162.31		0	0		0	0
Avr	18.25	11.82	205.04		0	0		0	0
Mai	18.6	12.06	271.91		0	0		0	0
Juin	10.57	6.85	315.53		0	0		0	0
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

Tableau III-12 : Calcul des besoins en eau pour l'Ail

Mois	Pmoy (mm)	Pe _{ff} (mm)	ET ₀ (mm/mois)	Z(m)	RFU (mm)	RS (mm)	K _c	ETM (mm)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55		0			0	0
Oct	23.52	15.24	165.91	0.2	2.71	0	0.5	82.96	67.72
Nov	21.53	13.95	146.26	0.2	2.71	0	0.75	109.70	95.75
Dec	17.47	11.32	79.77	0.4	5.42	0	0.85	67.80	56.48
Jan	22.54	14.61	83.81	0.4	5.42	0	0.9	75.43	60.82
Fev	13.12	8.5	98.46	0.4	5.42	0	0.7	68.92	60.42
Mars	15.3	9.91	162.31	0.4	5.42	0	0.55	89.27	79.36
Avr	18.25	11.82	205.04		0	0		0	0
Mai	18.6	12.06	271.91		0	0		0	0
Juin	10.57	6.85	315.53		0	0		0	0
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

III.3.1.3 Estimation des besoins en eau des arboricultures :

Tableau III-13 : 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)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55	1.5	20.32		0.75	170.66	149.98
Oct	23.52	15.24	165.91	1.5	20.32	0	0.75	124.43	109.19
Nov	21.53	13.95	146.26	1.5	20.32	0	0.75	109.70	95.75
Dec	17.47	11.32	79.77	1.5	20.32	0	0.65	51.85	40.53
Jan	22.54	14.61	83.81	1.5	20.32	0	0.65	54.48	39.87
Fev	13.12	8.5	98.46	1.5	20.32	0	0.65	64.00	55.50
Mars	15.3	9.91	162.31	1.5	20.32	0	0.65	105.50	95.59
Avr	18.25	11.82	205.04	1.5	20.32	0	0.65	133.28	121.46
Mai	18.6	12.06	271.91	1.5	20.32	0	0.65	176.74	164.68
Juin	10.57	6.85	315.53	1.5	20.32	0	0.65	205.09	198.24
Juill	0.51	0.33	347.93	1.5			0.65	226.15	225.82
Aout	4.71	3.06	316.09	1.5			0.65	205.46	202.40

III.3.1.4 Estimation des besoins en eau des Fourragères :

Tableau III-14 : 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)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55		0			0	0
Oct	23.52	15.24	165.91		0	0		0	0
Nov	21.53	13.95	146.26		0	0		0	0
Dec	17.47	11.32	79.77		0	0		0	0
Jan	22.54	14.61	83.81		0	0		0	0
Fev	13.12	8.5	98.46		0	0		0	0
Mars	15.3	9.91	162.31	0.3	4.06	0	0.4	64.92	55.01
Avr	18.25	11.82	205.04	0.8	10.84	0	0.6	123.02	111.20
Mai	18.6	12.06	271.91	1.2	16.26	0	0.8	217.53	205.47
Juin	10.57	6.85	315.53	1.2	16.26	0	0.6	189.32	182.47
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

Tableau III-15 : 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)	B _{net} + lessivage (mm)
Sep	31.91	20.68	227.55		0			0	0
Oct	23.52	15.24	165.91	0.4	5.42	0	0.3	49.77	34.53
Nov	21.53	13.95	146.26	0.7	9.48	0	0.4	58.50	44.55
Dec	17.47	11.32	79.77	0.9	12.19	0	0.7	55.84	44.52
Jan	22.54	14.61	83.81	1	13.55	0	0.85	71.24	56.63
Fev	13.12	8.5	98.46	1.2	16.26	0	0.95	93.54	85.04
Mars	15.3	9.91	162.31	1.2	16.26	0	1.05	170.43	160.52
Avr	18.25	11.82	205.04	1.2	16.26	0	1	205.04	193.22
Mai	18.6	12.06	271.91	1.2	16.26	0	0.8	217.53	205.47
Juin	10.57	6.85	315.53	1.2	16.26	0	0.25	78.88	72.03
Juill	0.51	0.33	347.93					0	0
Aout	4.71	3.06	316.09					0	0

III.4. Calcul des besoins en eau pour les assolements 1 et 2 :

Tableau III-16 : Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 1 :

Culture	Blé	Pomme de terre	Oignon	Olivier	Sorgho	Total
Septembre		93.10		149.98		243.08
Octobre	34.53	100.90	67.72	109.19		312.34
Novembre	44.55	125	95.75	95.75		361.05
Décembre	36.54	48.51	64.46	40.53		190.04
Janvier	35.68		60.82	39.87		136.37
Février	50.58		60.42	55.50		166.5
Mars	152.40			95.59	55.01	303
Avril	172.72			121.46	111.20	405.38
Mai	224.50			164.68	205.47	594.65

Juin	65.72			198.24	182.47	446.43
Juillet				2		225.82
Août				202.40		202.40

Tableau III-17 : Récapitulatif des besoins nets (mm) pour l'assolement 2 :

Culture	Orge grain	Ail	Betterave	Olivier	Avoine	Total
Septembre				149.98		149.98
Octobre		67.72		109.19	34.53	211.44
Novembre	29.93	95.75	44.55	95.75	44.55	310.53
Décembre	20.59	56.48	28.57	40.53	44.52	190.69
Janvier	44.06	60.82	44.06	39.87	56.63	245.44
Février	75.19	60.42	70.27	55.50	85.04	346.42
Mars	144.28	79.36	144.28	95.59	160.52	624.03
Avril	141.96		121.46	121.46	193.22	578.1
Mai	137.49			164.68	205.47	507.64
Juin	119.36			198.24	72.03	389.63
Juillet				225.82		225.82
Août				202.40		202.4

III.5. Calcul des débits Spécifiques :

Les débits spécifiques sont déterminés en fonction des besoins hydriques de chaque culture, calculés à partir de la répartition culturale préalablement établie. Pour répondre efficacement aux exigences mensuelles en eau, le volume à irriguer est basé sur la consommation maximale estimée, et distribué en débit continu sur une plage de 24 heures par jour. Ce débit est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$q_s = \frac{B_{net}}{N_j * N_i * 3600 * E_i} \dots (III. 9)$$

Avec :

- **B_{net}** : Demande nette du mois de pointe en millimètres par mois,
 - **N_i** : nombre des heures d'irrigation=24h,
 - **N_j** : nombre de jours du mois de pointe =31 jours,
 - **E_i** : Efficience d'irrigation que nous avons estimée à 75%.
- Les besoins en eau pour l'assolement le plus exigeant (Assolement 1) :

Les besoins de pointe correspondent au mois de mars :

Besoin max mensuel = 624.03 mm

$$Q_{sp} = (\text{besoin max} * 10 * 1000) / (3600 * \text{Nb de jour} * \text{Nb de heure} * \text{efficience})$$

Donc :

$$q_s = 3.11 \text{ l/s/ha} > 1.5 \text{ l/s/ha}$$

Le débit spécifique initialement obtenu étant supérieur à 1,5, cela peut entraîner un surdimensionnement des conduites, qu'elles soient de refoulement ou gravitaires. Pour éviter cette situation, trois approches d'estimation du débit spécifique peuvent être envisagées :

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

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

$$B_{net} = 225.82 \text{ mm} \Rightarrow q_s = 1.2 \text{ l/s/ha.}$$

III.6. Calcul débit caractéristique :

Le débit caractéristique constitue un élément fondamental dans la planification et la conception des réseaux de distribution d'eau, ainsi que des infrastructures qui y sont associées, afin de garantir une gestion rationnelle et durable des ressources en eau.

$$Q_{car} = q_s * s \dots (III.10)$$

- **q_s** : Débit spécifique du mois de pointe en litres par seconde par hectare (l/s/ha)

- **S** : la superficie nette à irriguer = 150 ha.

$$Q_{\text{car}} = 181.5 \text{ l/s} = 0.181 \text{ m}^3/\text{s}.$$

III.7. Les volumes d'eau d'irrigation :

Les volumes d'eau d'irrigation correspondent à la quantité d'eau indispensable pour satisfaire les besoins hydriques d'une culture ou d'une surface cultivée déterminée. Cette quantité varie en fonction de plusieurs paramètres, notamment le type de culture concerné ainsi que la superficie à irriguer.

$$\text{Le volume d'eau} = \text{Besoins bruts de la culture (m}^3\text{)} * \text{la surface (ha)}$$

Tableau III-18 : volume d'eau d'irrigation.

Culture	Surface (ha)	Besoins nets (m ³ /ha)	Besoins bruts (m ³ /ha)	Besoins totaux (m ³)
Orge grain	67.5	7128.6	9504.8	6 15 74
Ail	19	4205.5	5607.33	106 539.27
Betterave	18.5	4531.9	6042.53	111 786.81
Olivier	30	14990.1	19986.8	599 604
Avoine	15	8965.1	11953.47	179 302.05
Somme	150	//	//	1 638 806.13

Le volume total d'eau nécessaire pour l'ensemble du périmètre est estimé à **1 638 806.13m³**.

III.8. Conclusion :

L'analyse des besoins en eau dans notre périmètre a permis d'estimer de manière précise les volumes requis pour garantir une irrigation efficiente. En tenant compte des données climatiques, des propriétés du sol et des besoins hydriques propres à chaque culture, le volume total nécessaire a été évalué à environ 1 638 806.13 m³. Une gestion rigoureuse de cette ressource s'avère indispensable pour assurer la pérennité des systèmes d'irrigation, améliorer la productivité agricole et éviter le gaspillage ainsi que le surdimensionnement des équipements.

Chapitre IV : Etude du system d'adduction et de distribution

IV.1. Introduction :

L'étude du système d'adduction et de distribution dans un périmètre d'irrigation nécessite l'examen de plusieurs aspects, tels que la source d'eau, les conduites, les pompes, les réservoirs et les équipements de régulation. Cette analyse permet de repérer les améliorations possibles afin d'augmenter l'efficacité et la rentabilité du système, tout en limitant les pertes en eau. Dans ce chapitre, nous aborderons les différents composants du système d'adduction et de distribution propre à notre périmètre d'irrigation, et nous examinerons les stratégies envisageables pour en optimiser le fonctionnement.

IV.2. Alimentation en eau du périmètre :

L'approvisionnement en eau du périmètre irrigué de Tarrouma s'appuie essentiellement sur des forages profonds. L'eau prélevée est dans un premier temps stockée dans un bassin aménagé à l'entrée du périmètre, assurant à la fois la régulation des débits et un stockage temporaire. Depuis ce bassin, l'eau est dirigée vers les parcelles agricoles à l'aide d'un système de pompage. Elle transite ensuite par des conduites principales qui desservent un réseau de distribution ramifié. Ce dernier se prolonge jusqu'aux bornes d'arrosage, installées directement sur les parcelles cultivées, garantissant ainsi une distribution localisée et efficiente de l'eau en fonction des besoins en irrigation.[14]

IV.3. Organisation du périmètre :

Le périmètre irrigué de Tarrouma s'étend sur une superficie totale de 150 hectares, divisée en 24 îlots dont la superficie varie entre 3.5 et 9.58 hectares. Cette configuration en îlots offre une meilleure organisation du réseau d'adduction, ce qui facilite la distribution de l'eau à l'ensemble des parcelles.

IV.3.1. Ilots et bornes d'irrigation :

Un îlot d'irrigation constitue une unité agricole bien délimitée, irriguée à l'aide d'un système spécifique. La répartition des bornes d'irrigation dans un périmètre organisé en îlots doit prendre en considération plusieurs paramètres, tels que la superficie des exploitations, la topographie du terrain ainsi que les contraintes économiques.

L'implantation des bornes doit être pensée de manière stratégique afin d'assurer une irrigation uniforme et performante.

L'aménagement des bornes dans un périmètre subdivisé en îlots doit répondre aux critères suivants :

- Chaque îlot d'exploitation doit être desservi par une seule prise d'eau.
- Chaque borne peut comporter un maximum de quatre prises.
- Les bornes doivent être implantées en limite des petits îlots, et au centre des grands îlots, afin d'assurer une distribution optimale de l'eau.

IV.3.2. Rôle et fonction de la borne d'irrigation :

La borne d'irrigation constitue un point de livraison d'eau essentiel entre le réseau collectif de distribution et la parcelle agricole. Elle joue un rôle clé dans la gestion locale de l'irrigation en assurant le passage contrôlé de l'eau vers l'exploitant.

Ses principales fonctions sont les suivantes :

- **Distribution de l'eau** : la borne permet l'alimentation en eau des parcelles agricoles selon les besoins en irrigation, en assurant un débit adapté.
- **Régulation et contrôle** : elle est souvent équipée de dispositifs permettant de mesurer, limiter ou interrompre le débit, facilitant ainsi le suivi et la gestion de la consommation d'eau.
- **Interface technique** : la borne constitue un point d'accès entre le réseau principal et les équipements de l'exploitant (conduites secondaires, systèmes de distribution internes).
- **Répartition équitable** : dans les périmètres collectifs, elle garantit une distribution équitable entre les différents usagers, en conformité avec les tours d'eau ou les règles d'exploitation en vigueur.

IV.3.3. Calcul hydraulique des bornes :

Les caractéristiques hydrauliques d'une borne d'irrigation sont principalement déterminées par le débit à assurer à l'entrée des parcelles qu'elle dessert. Ce débit est estimé en fonction de la superficie de l'îlot concerné ainsi que du débit spécifique nécessaire à l'irrigation.

Le débit est calculé comme suit :

$$Q_b = q_s * S \dots (IV.1)$$

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

IV.4. Etude de système de pompage :

Le système de pompage en irrigation regroupe l'ensemble des dispositifs et équipements permettant de capter l'eau à partir d'une source, telle qu'un puits, une rivière ou un réservoir, et de l'acheminer vers les zones agricoles ou les réseaux d'irrigation. Il est conçu pour assurer l'alimentation en eau des cultures et garantir une distribution efficace à travers les parcelles.

En général, un système de pompage d'irrigation se compose des éléments suivants :

- **Pompe** : Constitue l'élément central du système, assurant l'aspiration et le refoulement de l'eau vers le réseau d'irrigation.

- **Source d'eau** : Il peut s'agir d'un puits, d'une rivière, d'un lac ou de tout autre réservoir situé à proximité de la zone à irriguer.
- **Conduites et canalisations** : Utilisées pour acheminer l'eau depuis la source jusqu'aux parcelles agricoles ou aux équipements d'irrigation.
- **Réservoir de stockage** : Dans certains cas, un bassin tampon est prévu pour emmagasiner l'eau pompée avant sa distribution vers les cultures.
- **Système de régulation** : Un dispositif de commande peut être intégré afin de contrôler le fonctionnement de la pompe et de surveiller différents paramètres, tels que la pression, le débit ou la température de l'eau.

IV.4.1. Types des pompes utilisé :

Selon les besoins hydrauliques et les caractéristiques du site, différents types de pompes peuvent être employés dans les systèmes d'irrigation, notamment les pompes axiales, semi-axiales et à écoulement radial.

- **Pompes axiales** :
Il s'agit de pompes à hélice dont les pales sont inclinées. Elles sont particulièrement adaptées au pompage de grands débits sous de faibles hauteurs manométriques, ce qui les rend idéales pour les applications nécessitant un volume important d'eau à faible élévation.
- **Pompes semi-axiales** :
Conçues pour délivrer également de grands débits à faible hauteur de refoulement, ces pompes maintiennent des vitesses d'entrée réduites. En raison de la faible hauteur à franchir, le diamètre de sortie reste modeste, nécessitant ainsi la fabrication de pompes hélico-centrifuges de grandes dimensions.
- **Pompes à écoulement radial** :
Ce sont des pompes centrifuges classiques, destinées au pompage de débits relativement faibles sur des hauteurs importantes. La hauteur de refoulement augmente avec le diamètre externe de la roue. Dans ce type de pompe, l'écoulement est radial et les pales sont généralement planes.

IV.4.2. Hauteur manométrique totale :

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. [15]

Elle est donnée par la formule :

$$HMT = (H_a + H_{ref}) + J + P_r + P_{Ns} \dots \text{(IV.4)}$$

Avec :

- **HMT** : Hauteur Manométrique Totale (en mètres) ;

- H_a : Hauteur d'aspiration (en mètres) ;
- H_{ref} : Hauteur de refoulement (m) ;
- H_g : Hauteur géométrique (m) ;
- J : Pertes de charge (m) ;
- P_r : Pression résiduelle (m) = 0.6 m ;
- P_{NS} : Pression nominale de service (cas de l'asperseur) = 25 m.

IV.4.2.1 Calcul de la hauteur géométrique H_g :

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

$$H_g = H_b - H_r \dots\dots (IV.3)$$

- H_b : Altitude de la borne la plus éloignée = 21.33 m
- H_r : Altitude du réservoir = 21.08 m
- $H_g = 0.25$ m

IV.4.2.2 Calcul des pertes de charge totales :

Les pertes de charge totales dans une conduite sont la somme des pertes :

- **Linéaires** : dues au frottement de l'eau contre les parois ;
- **Singulières** : causées par les accessoires (vannes, coudes, etc.).

a. Pertes de charge totales linéaires :

Calculées avec la formule de Hazen-Williams :

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

Avec :

- J : Perte de charge en m.
- CH_W : Coefficient de Hazan-Williams = 130.
- L : Longueur de la conduite, $L = 1957.51$ m.
- D : Diamètre de refoulement.
- Q : Le débit de refoulement m^3/s . [15]

b. Calcul des pertes de charge singulière

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

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

IV.4.3. Calcul du débit de refoulement :

Le débit total à refouler est déterminé comme suit :

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

$$Q_c = 0.18 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Donc } Q_{\text{forcé}} = 1,05 \times 0,181 = 0.19 \text{ m}^3/\text{s}.$$

IV.4.4. Calcul du diamètre approximatif :

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

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

$$D = \sqrt{0,19} = 0.435 = 435 \text{ mm}.$$

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-1 : Résultats du calcul de la HMT pour différents diamètres :

Diamètre (mm)	V (m/s)	Linéaire (m)	PDC lin	PDC sing	PDC tot	HMT (m)
300	2.69	1957.51	41.29	4.13	45.42	71.27
400	1.51	1957.51	10.17	1.02	11.19	37.04
500	0.97	1957.51	3.43	0.34	3.77	29.62
600	0.67	1957.51	1.41	0.14	1.55	27.40
700	0.49	1957.51	0.67	0.07	0.73	26.58

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.4.4.1 Calcul des frais d'investissement :

La formule des frais d'investissement est la suivante :

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

Où :

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

Avec :

- **A** : coefficient d'amortissement.
- **i** : Annuité (valeur arrêtée par les autorités concernées) $i = 0.08$.
- **n** : Durée de projection du réseau d'adduction ; On prend : $n = 30$ ans.
- **Pr_t** : Prix de la conduite + prix de pose (DA).
- **L_{ref}** : Longueur de la conduite de refoulement. [15]

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

Tableau IV-2 : Estimation des frais d'investissement selon le diamètre de la conduite.

Diamètre (mm)	Prix de pose (DA)	Prix de Ml (DA)	L (m)	Prix tot (DA)	A	F inv(DA)
300	500	7500	1957.51	15660080	0.088	1378087.04
400	650	8490	1957.51	17891641.4	0.088	1574464.44
500	890	10800	1957.51	22883291.9	0.088	2013729.69
600	950	13000	1957.51	27307264.5	0.088	2403039.28
700	1100	15900	1957.51	33277670	0.088	2928434.96

IV.4.4.2 Calcul des frais d'exploitation :

La formule des frais d'exploitation s'écrit comme suit :

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

Avec :

- **F_{exp}** : Frais d'exploitation (en DA),
- **E** : Énergie totale consommée par la pompe (en kWh),
- **e** : Prix unitaire du kWh fixé par SONELGAZ, soit ($e = 4,67$ DA/kWh).

• Calcul de la puissance absorbée par la pompe

La puissance absorbée est déterminée selon la formule :

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

Avec :

- **P** : Puissance absorbée par la pompe (KwH).
- **g** : Accélération de la pesanteur (m/s^2).
- **Q_{forcé}** : Débit à refoulé (m^3/s).
- **HMT** : Hauteur manométrique totale (m).
- **η** : Rendement du pompage (75 %). [15]

- **Calcul de l'énergie consommée**

L'énergie annuelle consommée par la station est :

$$E = P \times t \times \eta \quad \text{... (IV.12)}$$

Avec :

- **E** : Énergie totale consommée par la pompe pendant une année (kWh).
- **P** : Puissance absorbée (KwH).
- **t** : Temps de pompage (heure) on prend $t = 22h$.

Le tableau suivant présente les frais d'exploitation annuels en fonction des différents diamètres de conduite :

Tableau IV-3 : Estimation des frais d'exploitation selon le diamètre de la conduite.

Diamètre (mm)	HMT	P (Kwh)	P (Kwh/an)	Fexp (DA)
300	71.27	177.12	1551528.58	7245638.45
400	37.04	92.05	806343.49	3765624.09
500	29.62	73.62	644929.13	3011819.04
600	27.40	68.10	596576.08	2786010.28
700	26.58	66.06	578724.09	2702641.48

IV.4.4.3 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 ci-dessous présente le calcul détaillé du bilan total des frais pour chaque diamètre considéré.

Tableau IV-4 : Bilan total des frais.

Diamètre (mm)	F _{exp} (DA)	F _{inv} (DA)	Bilan (Da)
300	7245638.45	1378087.04	8623725.49
400	3765624.09	1574464.44	5340088.53
500	3011819.04	2013729.69	5025548.72
600	2786010.28	2403039.28	5189049.56
700	2702641.48	2928434.96	5631076.44

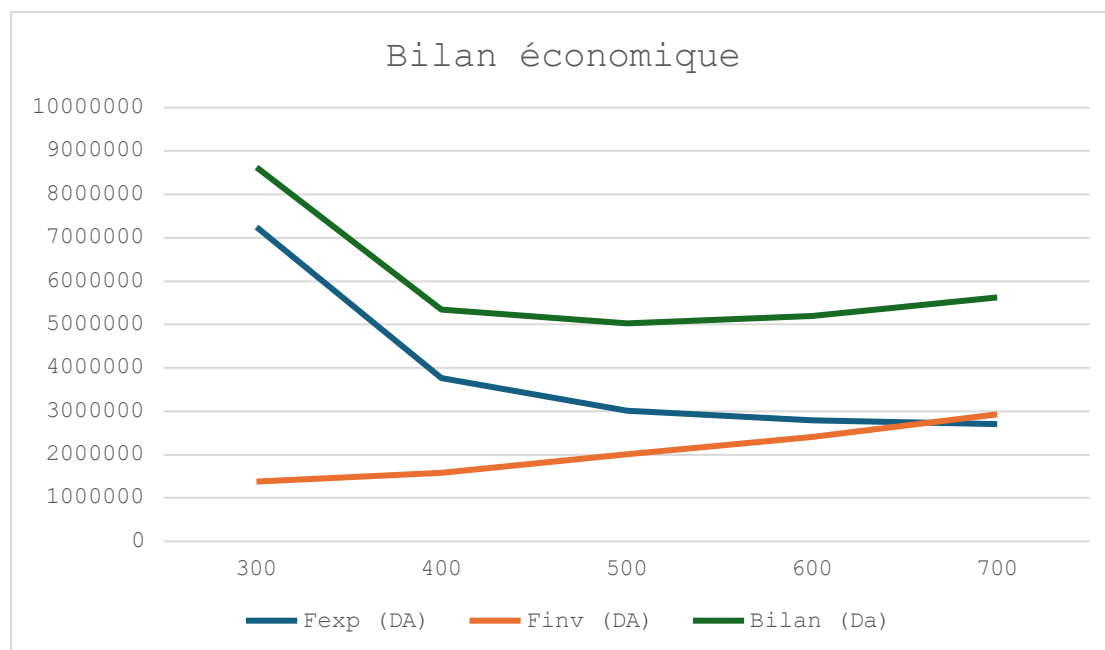


Figure IV-1 : Bilan économique total en fonction des diamètres étudiés.

Selon les résultats de l'étude technico-économique, le diamètre retenu pour la conduite de refoulement est de 500 mm, ce qui correspond à un débit de 0,19 m³/s et une hauteur manométrique totale (HMT) de 29.62m.

IV.4.5. Choix de nombre et de type de pompe :

Le choix du nombre de pompe se base sur plusieurs critères à savoir : [16]

- Assurer le débit et la hauteur HMT ;
- Meilleur rendement ;
- Vérifier la condition de non cavitation ;
- Vitesse de rotation la plus élevée ;
- Puissance absorbée minimale ;
- (NPSH)_r minimal.

Le tableau ci-dessus présente la variation du nombre de pompes de secours à installer en fonction des pompes principales.

Tableau IV-5 : Choix du nombre de pompes de secours.

Nombre de pompes principales	Nombre de pompes de secours
$N_p < 4$	1 pompe de secours
$4 < N_p < 6$	2 pompes de secours
$N_p > 6$	3 pompes de secours

Dans notre situation, nous avons utilisé le logiciel Caprari pour déterminer le type et le nombre de pompes à utiliser.

Tableau IV-6 : Choix de nombre de pompes.

N	Q (l/s)	HMT(m)	Type de la Pompe	η (%)	N (tr/min)	P abs (KW)	NPSHr	Ø mm
1	190	29.62	-	-	-	-	-	-
2	95	29.62	MEC-A 1/125	69.4	2950	44.3	4.6	125
3	63.3	29.62	MEC-A3/125	79.7	1450	25.6	3.15	125
4	47.5	29.62	MEC-A4/100	76.7	1450	19.8	3.31	125

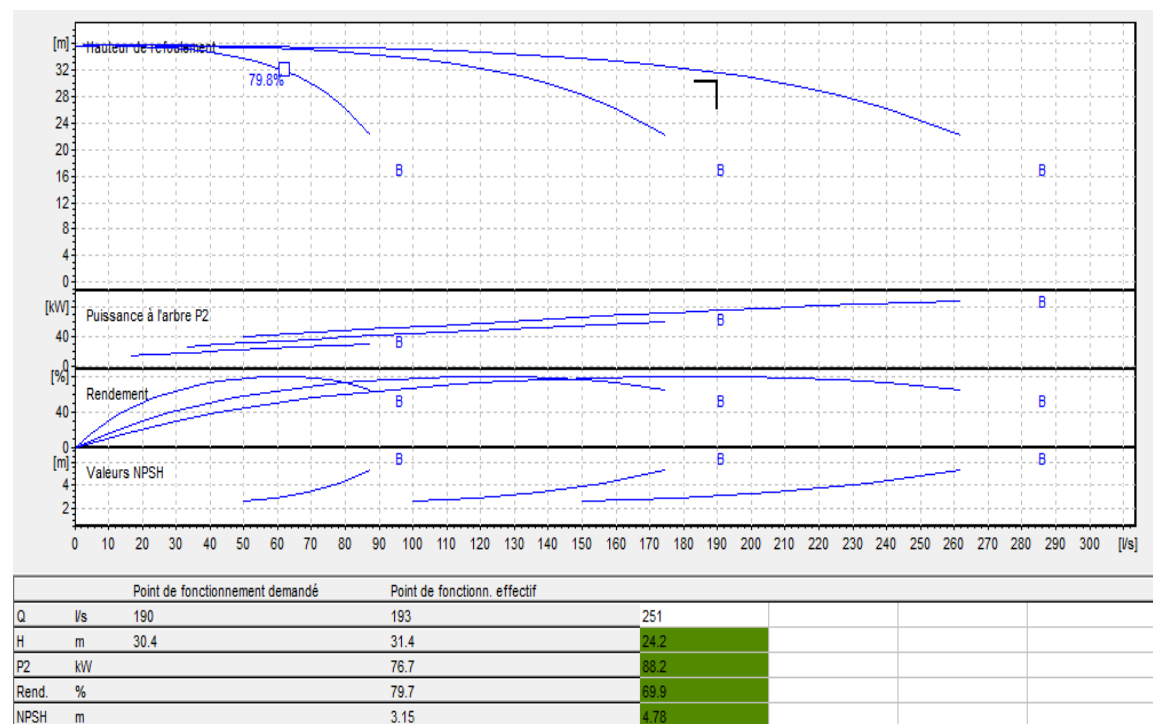


Figure IV-2 : Courbe de fonctionnement de la pompe choisie.

Après comparaison des caractéristiques techniques des différentes options de pompes, et en tenant compte des critères techniques et économiques, le choix s'est porté sur une configuration composée de trois pompes identiques complétées par une pompe de secours, avec les spécifications suivantes :

- Rendement : 79.7 %.
- Puissance absorbée : 25.6 kW.
- NPSHr minimal : 3.15 m.
- Vitesse de rotation : 1450 (tr/min).

IV.4.5.1 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. [15]

Pour protéger la pompe contre ce phénomène, il est indispensable de vérifier la condition suivante :

$$(\text{NPSH})_d > (\text{NPSH})_r$$

Avec :

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

$$(\text{NPSH})_d = \frac{P_{at}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - \left(h_a + \frac{V_{asp}^2}{2g} + \Delta H_{asp} \right) \dots \dots \text{(IV.13)}$$

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 $h_a = 0$

➤ V_{asp} : Vitesse d'écoulement dans la conduite d'aspiration.[15]

Tableau IV-7 : Variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

H (m)	- 50	0	100	300	500	1500	2000
$\frac{P_{at}}{\rho g}$	10.86	10.33	10.2	10.06	9.7	8.6	8.4

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} :

$$Q = 63.3 \text{ l/s} \longrightarrow D = 300 \text{ mm} \longrightarrow V_{asp} = \frac{Q}{S} = \frac{0.0633}{0.071} = 0.89 \text{ m/s}$$

Calcul de ΔH_{asp} :

$$\Delta H_{asp} = \frac{8 \times \lambda \times L_{asp} \times Q^2}{\pi^2 \times g \times D^5} = \frac{8 \times 0.027 \times 4 \times 0.0633^2}{\pi^2 \times 9.81 \times 0.3^5} = 0,01 \text{ m}$$

$$\lambda = \left(1.14 - 0.86 \ln \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)\right)^{-2} = \left(1.14 - 0.86 \ln \left(\frac{0.001}{0.3}\right)\right)^{-2} = 0,027$$

$$(\text{NPSH})_a = 10.33 - 0.24 - 2 - 0.04 - 0.01 = \mathbf{8.04}$$

$$(\text{NPSH})_r = 3.15 + r = 3.15 + 0.5 = \mathbf{3.65}, (r : \text{marge de sécurité varie entre } 0.3_0.5)$$

Donc la pompe est bien protégée contre le risque de cavitation.

IV.4.6. Dimensionnement du bassin de stockage :

Compte tenu de la grande superficie à irriguer, il a été décidé d'adopter un réservoir de forme rectangulaire.

Le volume du réservoir est estimé selon la formule suivante :

$$V = Q_C \times T_{nf} \dots (\text{IV.14})$$

Avec :

- **V** : volume d'eau d'irrigation (en m^3)
- **Q_c** : débit caractéristique (en m^3/h), $Q_c = 648 m^3/h$
- **T_{nf}** : temps de non-fonctionnement, pris égal à 1 heure

$$V = 648 \times 1 = 648 m^3. \text{ Donc } V = 650 m^3$$

❖ **Les dimensions du bassin :**

- $H = 2m$
- $L = 25m$
- $l = 13m$.

IV.5. Etude du système d'adduction-distribution :

L'alimentation en eau du périmètre irrigué de Tarrouma sera assurée par pompage depuis le bassin de stockage. L'eau sera ensuite acheminée sous pression vers le périmètre à travers une conduite principale de refoulement, dont le diamètre initial est de 500 mm.

IV.5.1. Calcul des diamètres :

L'estimation du diamètre économique des conduites s'appuie sur la formule de LABYE. Cette méthode permet de calculer un diamètre théorique initial, qui sera ensuite ajusté en fonction des dimensions normalisées disponibles sur le marché. La formule utilisée est la suivante :

$$D = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times V_{adm}}} \dots (IV.15)$$

Avec :

- **D** : Diamètre intérieur de la conduite (en mm),
- **Q** : Débit d'eau circulant (en m^3/s),
- **V_{adm}** : Vitesse admissible dans la conduite (en m/s).

Dans notre projet :

- Les conduites de diamètre ≤ 315 mm seront en PEHD,
- Celles de diamètre supérieur à 315 mm seront en fonte

IV.5.2. Calcul des pertes de charge linéaires :

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

$$\Delta H_L = \left(\frac{3.592}{CH_W}\right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}} * Q^{1.852} \dots \text{(IV.16)}$$

- ΔH_L : Perte de charge en m.
- CH_W : Coefficient de Hazan-Williams = 130.
- L : Longueur de la conduite,
- D : Diamètre de refoulement.
- Q : Le débit de refoulement m³/s. [15]

IV.5.3. Calcul des pressions des nœuds et des bornes :

Le calcul des vitesses et des pressions a été effectué à l'aide du logiciel EPANET. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous.

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

N° du tronçon	Longueur du tronçon (m)	Débit (l/s)	Diamètre calculé (mm)	Diamètre Nominall (mm)	Diamètr e interieur (mm)	Matériau	Vitesse (m/s)	Perte de charge lin (m)	Perte de charge total (m)	Cote de terrain aval Z (m)	Cote Peiezometrique (m)	Pression au point (m)	Pression (bars)
R-N1	94.84	190	401.69	522	500	Fonte	0.89	0.17	0.18	21.38	54.58	33.2	3.32
N1-ST	94.84	190	401.69	522	500	Fonte	0.89	0.17	0.18	21.34	53.83	32.49	3.25
ST-N2	259.4	190	401.69	522	500	Fonte	0.89	0.45	0.50	21.75	54.06	32.31	3.23
N2-N3	163.9	12.79	104.22	125	110.2	PEHD	1.04	3.07	3.37	21.32	52.41	31.09	3.11
N3-B1	31.19	5.76	69.94	90	79.2	PEHD	0.91	0.67	0.73	21.30	52.04	30.74	3.07
N3-N4	189.6	7.03	77.27	110	96.8	PEHD	0.74	2.20	2.42	20.86	51.23	30.37	3.04
N4-B2	32.54	7.03	77.27	110	96.8	PEHD	0.74	0.38	0.42	20.85	51.02	30.17	3.02
N2-N5	203.4	12.59	103.40	125	110.2	PEHD	1.03	3.70	4.06	22.39	52.06	29.67	2.97
N5-B3	28.39	7.07	77.49	110	96.8	PEHD	0.74	0.33	0.37	22.47	51.89	29.42	2.94
N5-N6	238.9	5.52	68.47	90	79.2	PEHD	0.87	4.71	5.18	22.91	49.53	26.62	2.66
N6-B4	31.01	5.52	68.47	90	79.2	PEHD	0.87	0.61	0.67	23.04	49.2	26.16	2.62
N2-N7	190.5	164.2	373.43	422	400	Fonte	1.17	0.76	0.83	21.71	53.46	31.75	3.18
N7-N8	217.4	16.44	118.16	140	123.4	PEHD	1.07	3.73	4.10	22.30	51.44	29.14	2.91
N8-B5	26.26	9.28	88.78	110	96.8	PEHD	0.98	0.51	0.56	22.28	51.16	28.88	2.89
N8-N9	162.7	7.16	77.98	110	96.8	PEHD	0.75	1.95	2.15	22.67	50.39	27.72	2.77
N9-B6	26.32	7.16	77.98	110	96.8	PEHD	0.75	0.32	0.35	22.65	50.22	27.57	2.76

N7-N10	182.9	147.76	354.24	422	400	Fonte	1.06	0.60	0.66	21.73	53	31.27	3.13
N10-N11	103.6	11.53	98.95	125	110.2	PEHD	0.94	1.60	1.76	21.99	52.13	30.14	3.01
N11-B7	27.49	4.76	63.58	90	79.2	PEHD	0.75	0.41	0.45	21.99	51.92	29.93	2.99
N11-N12	203.6	6.91	76.61	110	96.8	PEHD	0.73	2.29	2.52	22.56	50.9	28.34	2.83
N12-B8	33.98	6.91	76.61	110	96.8	PEHD	0.73	0.38	0.42	22.60	50.7	28.10	2.81
N10-N13	40.71	136.23	340.14	422	400	Fonte	0.97	0.11	0.13	21.74	52.92	31.18	3.12
N13-N14	97.92	28.03	154.29	180	158.6	PEHD	1.10	1.33	1.46	21.51	52.19	30.68	3.07
N14-B9	23.36	7.13	77.82	110	96.8	PEHD	0.75	0.28	0.31	21.51	52.04	30.53	3.05
N14-N15	117.3	20.9	133.23	160	141	PEHD	1.04	1.64	1.80	21.29	51.3	30.01	3.00
N15-B10	23.38	11.5	98.83	125	110.2	PEHD	0.94	0.36	0.40	21.29	51.11	29.82	2.98
N15-N16	123.8	9.4	89.35	110	96.8	PEHD	0.99	2.46	2.71	21.06	49.98	28.92	2.89
N16-B11	26.96	9.4	89.35	110	96.8	PEHD	0.99	0.54	0.59	21.03	49.69	28.66	2.87
N13-N17	144.8	108.2	303.13	355	312.8	PEHD	1.09	0.88	0.97	21.79	52.58	30.79	3.08
N17-N18	181.9	12.82	104.34	125	110.2	PEHD	1.05	3.42	3.76	21.43	50.73	29.30	2.93
N18-B12	23.62	5.8	70.18	90	79.2	PEHD	0.91	0.51	0.56	21.41	50.45	29.04	2.90
N18-N19	188.8	7.02	77.21	110	96.8	PEHD	0.74	2.19	2.40	21.09	49.55	28.46	2.85
N19-B13	26.53	7.02	77.21	110	96.8	PEHD	0.74	0.31	0.34	21.05	49.38	28.33	2.83
N17-N20	10.2	95.38	284.61	355	312.8	PEHD	0.96	0.05	0.05	21.79	52.55	30.76	3.08
N20-N21	124.4	14.27	110.09	140	123.4	PEHD	0.93	1.64	1.81	22.07	51.67	29.60	2.96
N21-B14	21.12	4.2	59.72	75	66	PEHD	0.95	0.61	0.67	22.06	51.34	29.28	2.93
N21-N22	164	10.07	92.48	110	96.8	PEHD	1.06	3.70	4.07	22.46	49.68	27.22	2.72
N22-B15	20.05	4.38	60.99	75	66	PEHD	0.99	0.63	0.69	22.46	49.34	26.88	2.69
N22-B16	126.5	5.69	69.51	90	79.2	PEHD	0.89	2.64	2.90	22.78	48.25	25.47	2.55

N20-N23	216.6	81.11	262.46	315	277.6	PEHD	1.04	1.38	1.52	21.36	51.6	30.24	3.02
N23-N24	126.5	12.43	102.74	125	110.2	PEHD	1.01	2.24	2.47	21.61	50.88	29.27	2.93
N24-B17	21.33	6.41	73.78	90	79.2	PEHD	1.01	0.55	0.61	21.59	50.58	28.99	2.90
N24-N25	232.7	6.02	71.50	90	79.2	PEHD	0.95	5.39	5.92	21.17	47.98	26.81	2.68
N25-B18	25.07	6.02	71.50	90	79.2	PEHD	0.95	0.58	0.64	21.16	47.67	26.51	2.65
N23-N26	79.36	68.68	241.51	280	246.8	PEHD	1.12	0.66	0.72	21.37	51.4	30.03	3.00
N26-N27	126.9	19.17	127.59	160	141	PEHD	0.95	1.51	1.66	21.88	50.83	28.95	2.90
N27-B19	18.11	8.84	86.65	110	96.8	PEHD	0.93	0.32	0.35	22.13	50.91	28.78	2.88
N27-N28	220.3	10.33	93.66	110	96.8	PEHD	1.09	5.22	5.74	22.52	48.27	25.75	2.58
N28-B20	21.36	10.33	93.66	110	96.8	PEHD	1.09	0.51	0.56	22.51	48	25.49	2.55
N26-N29	193.1	49.51	205.05	250	220.4	PEHD	1.01	1.51	1.67	21.91	51.56	29.65	2.97
N29-N30	179.9	17.46	121.77	140	123.4	PEHD	1.13	3.45	3.80	21.63	49.68	28.05	2.81
N30-B21	15.24	8.72	86.06	110	96.8	PEHD	0.92	0.26	0.29	21.63	49.55	27.92	2.79
N30-N31	166.4	8.74	86.15	110	96.8	PEHD	0.92	2.89	3.18	21.36	48.14	26.78	2.68
N31-B22	19.65	8.74	86.15	110	96.8	PEHD	0.92	0.34	0.38	21.32	47.95	26.63	2.66
N29-N32	127.6	13.44	106.84	125	110.2	PEHD	1.10	2.62	2.88	22.10	50.14	28.04	2.80
N32-B23	12.71	6.83	76.16	90	79.2	PEHD	1.07	0.37	0.41	22.09	49.94	27.85	2.79
N32-N33	177.6	6.61	74.92	90	79.2	PEHD	1.04	4.89	5.38	22.42	47.51	25.09	2.51
N33-B24	39.88	6.61	74.92	90	79.2	PEHD	1.04	1.10	1.21	22.49	46.92	24.43	2.44

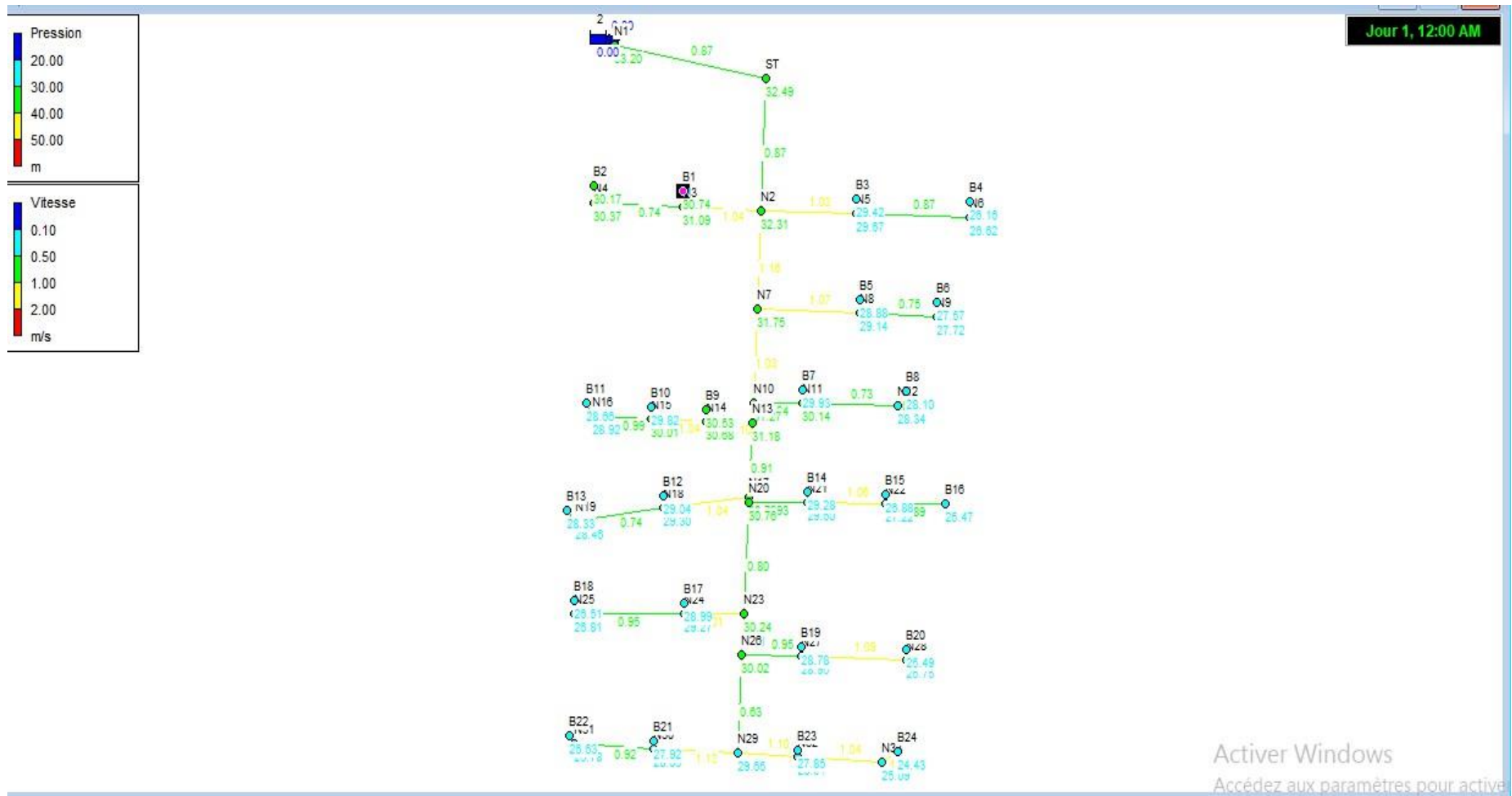


Figure IV-3 : Présentation du réseau sur logiciel EPANET.

- **Interprétation :**

Le tableau des résultats des calculs hydrauliques met en évidence une conception globalement cohérente du réseau d'irrigation, tant du point de vue des vitesses que des pressions observées dans les différentes sections.

1. Vitesses d'écoulement (m/s) :

Les vitesses observées dans le réseau s'étendent de 0.73 m/s à 1.17 m/s, avec une majorité des tronçons situés entre 0.9 et 1.05 m/s. Ces valeurs sont conformes aux recommandations pour les réseaux sous pression, notamment en irrigation, où une vitesse supérieure à 0.6 m/s est requise pour éviter les dépôts solides.

2. La pression (bar) :

Les pressions relevées aux points de consommation varient entre 2.44 bars (dans la borne la plus éloignée du réseau) et 3.32 bars en amont.

Irrigation par aspersion : Les pressions observées (souvent entre 2.5 et 3.5 bars) sont adaptées au bon fonctionnement des asperseurs, qui nécessitent généralement entre 2 et 4 bars ; Irrigation localisée (goutte-à-goutte) : Ce système est opérationnel dès 1 bar. Les bornes situées à l'extrémité du réseau, comme B20, B24 et B13, présentent des pressions de l'ordre de 2.4 à 2.8 bars, largement suffisantes pour ce type d'irrigation.

IV.6. Conclusion :

Ce chapitre a présenté l'analyse hydraulique du réseau de distribution, incluant les débits, les diamètres, les pertes de charge et les pressions aux bornes.

Le périmètre comprend 24 îlots, couvrant 150 ha. Les vitesses d'écoulement observées varient entre 0.73 et 1.17 m/s, ce qui respecte les normes pour un fonctionnement efficace. Les pressions disponibles aux bornes vont de 2.44 à 3.32 bars, ce qui permet d'alimenter convenablement des systèmes d'irrigation tels que l'aspersion (2–4 bars) et le goutte-à-goutte (≈ 1 bar).

Le réseau est ainsi jugé performant et adapté aux besoins du périmètre irrigué.

Chapitre V : Les Techniques d'irrigation

V.1. Introduction :

Le choix du système d'irrigation constitue une étape cruciale dans la gestion efficace de l'eau en agriculture. Il dépend de multiples facteurs, notamment le type de culture, les conditions climatiques locales, la nature du sol, la topographie du terrain ainsi que les contraintes économiques. L'objectif principal est d'assurer un apport hydrique optimal, tout en réduisant les pertes liées à l'évaporation ou à l'infiltration. Par ailleurs, la simplicité d'installation, la facilité d'entretien et la durabilité du système sont des critères essentiels pour garantir une exploitation rentable et durable.

V.2. Les principales techniques d'irrigation :

Dans le domaine agricole, cinq techniques majeures d'irrigation sont couramment employées :

1. L'irrigation par aspersion.
2. L'irrigation localisée (goutte-à-goutte).
3. L'irrigation par gravité (surface).
4. L'irrigation par submersion.
5. L'irrigation par pivot central.

V.2.1. Irrigation par aspersion :

Cette technique consiste à pulvériser de l'eau sous forme de fines gouttelettes sur les cultures, imitant ainsi une pluie artificielle. Elle est largement utilisée en raison de sa flexibilité et de sa capacité à couvrir de vastes superficies.



Figure V-1 : L'irrigation par aspersion.

Source : (adn-global.com)

Les Avantages :

- Distribution homogène de l'eau sur l'ensemble de la parcelle.

- Adaptabilité à une grande diversité de cultures.
- Possibilité d'irriguer de grandes surfaces avec un seul système.
- Permet de contrôler la quantité d'eau apportée.

Les Inconvénients :

- Pertes d'eau significatives dues à l'évaporation et au vent.
- Risque de ruissellement entraînant un gaspillage hydrique.

V.2.2. Irrigation localisée (goutte-à-goutte) :

Cette méthode vise à apporter l'eau directement à la zone racinaire des plantes, goutte à goutte, optimisant ainsi l'usage de la ressource hydrique.



Figure V-2 : L'irrigation par goutte à goutte.

Source : (edenapp.com)

Les Avantages :

- Réduction notable de l'évaporation.
- Amélioration de l'efficacité de l'irrigation et qualité de l'eau utilisée.
- Réduction du développement des mauvaises herbes (seules les zones proches des plantes sont arrosées).
- Moins de maladies (les feuilles restent sèches, limitant les pathogènes).

Les Inconvénients :

- Coûts d'installation et d'entretien relativement élevés.
- Risque d'obstruction des goutteurs si l'eau n'est pas bien filtrée.
- Moins adaptée aux cultures à forte densité ou aux sols très sableux sans ajustements.

V.2.3. Irrigation par gravité (surface) :

Technique ancestrale utilisant la gravité pour acheminer l'eau vers les cultures à partir d'une source naturelle, par l'intermédiaire de canaux ou de tranchées.



Figure V-3 : : L'irrigation par gravité.

Source : (freepik.es)

Les Avantages :

- Ne requiert pas d'énergie externe (électricité ou carburant).
- Faibles coûts de mise en œuvre et d'entretien.

Les Inconvénients :

- Distribution souvent irrégulière de l'eau.
- Risques d'érosion du sol et lessivage des nutriments.
- Limitée aux terrains en pente ou aux exploitations proches d'une source d'eau.

V.2.4. Irrigation par submersion :

Également appelée irrigation par inondation, cette technique consiste à immerger les champs dans l'eau, particulièrement adaptée aux cultures exigeant une forte humidité, comme le riz.



Figure V-4 : L'irrigation par submersion.

Source : ([istockphoto.com](https://www.istockphoto.com))

Les Avantages :

- Approvisionnement continu en eau favorisant la croissance des cultures.
- Faible consommation d'énergie et fertilisation naturelle par dépôt de sédiments.

Les Inconvénients :

- Importantes pertes par évaporation.
- Risques d'accumulation excessive de sels dans le sol, affectant sa fertilité.

V.2.5. Irrigation par pivot central :

Méthode mécanisée où un bras pivotant équipé de buses arrose circulairement la parcelle, alimenté par un moteur ou un système solaire.



Figure V-5 : L'irrigation par pivot central.

Source : ([ics-agri.com](https://www.ics-agri.com))

Les Avantages :

- Arrosage uniforme sur de grandes surfaces circulaires.
- Consommation énergétique réduite.

Les Inconvénients :

- Investissement initial et coûts de maintenance élevés.
- Peu adapté aux terrains accidentés ou irréguliers.

V.3. Conclusion :

Dans le cadre d'un aménagement hydro-agricole en zone aride, le choix de la technique d'irrigation revêt une importance capitale pour une gestion rationnelle des ressources en eau.

À l'issue de l'analyse comparative des différentes méthodes d'irrigation, notre étude préconise une approche combinée, intégrant deux systèmes complémentaires, adaptés aux caractéristiques de la zone étudiée :

- L'irrigation goutte à goutte particulièrement appropriée pour les cultures arboricoles.
- L'irrigation par aspersion mieux adaptée aux cultures céréalières et maraîchères.

Chapitre VI : Dimensionnement à la parcelle

VI.1. Introduction :

Le dimensionnement des parcelles constitue une étape essentielle dans la planification d'un schéma d'aménagement. Il est étroitement lié au choix de la technique d'irrigation retenue.

Ce chapitre est consacré à l'analyse des méthodes permettant de déterminer les dimensions optimales des parcelles, en tenant compte à la fois du système d'irrigation sélectionné et des contraintes spécifiques techniques, climatiques et topographiques propres à la zone étudiée au sein du périmètre irrigué.

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

Le système d'irrigation goutte à goutte sera mis en œuvre sur l'îlot n°24, alimenté par la borne B24. La pression disponible à ce point est estimée à 2.44 bars, ce qui est largement suffisant pour assurer un fonctionnement optimal du réseau. La parcelle concernée couvre une superficie de 2 hectares et présente une configuration régulière, facilitant la mise en place homogène du système et garantissant une distribution efficace de l'eau sur l'ensemble de la surface cultivée.

Données générales :

- Culture : Olivier ;
 - Espacement entre arbre sur la ligne : 4 m ;
 - Espacements entre ramps : 4 m ;
 - Besoins de pointe 225.82 mm (Juillet) ;
 - Surface brute de la parcelle : 2 ha.
- Caractéristique du gouteur
 - Débit nominal : 4 l/h ;
 - Pression nominale : 10 m.c.e ;
 - Le nombre de goutteurs est 2 goutteurs par arbre, Avec un espacement des goutteurs de 2 m.

VI.2.1. Besoins d'irrigation des cultures en irrigation localisée :

La détermination des besoins en eau dans un système d'irrigation goutte à goutte repose sur l'analyse de plusieurs paramètres.

VI.2.1.1 Impact du taux de couverture du sol :

En micro-irrigation, où l'eau est appliquée de manière localisée sur une portion restreinte de la surface du sol, l'évapotranspiration de référence (ETM) est corrigée à l'aide d'un coefficient de réduction, afin de tenir compte du taux de couverture végétale

(Cs = 60 %) pour les plantes adultes. Ce coefficient, noté Kr, Bien que l'estimation de ce coefficient est faite par l'utilisation de l'une des formules Suivantes : [17]

- (Keller & Karmeli, 1974)

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

- Decroix, CTGREF

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

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

On prend Kr = 0,7 [17]

Cette valeur intègre une marge de sécurité suffisante, permettant d'éviter toute sous-estimation des besoins hydriques et d'assurer ainsi une irrigation efficace, conforme aux exigences de la culture.

Donc :

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

$$B_{nets} = (225.82/30) * 0.7 = 5.27 \text{ mm/j.}$$

VI.2.1.2 Calcul de la dose nette :

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

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

Avec :

- hcc : humidité à la capacité au champ,
- hpf : humidité au point de flétrissement,

- **Z** : profondeur explorée par les racines,
- **Y** : coefficient dépendant du type de sol (**généralement 2/3**),
- **Da** : densité apparente du sol,
- **P** : Pourcentage du sol humidifié.

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

Avec :

- **N** : Nombre de goutteurs de distribution par arbre ;
- **Spd** : Distance entre deux points de distribution voisins du même arbre ;
- **Sh** : Largeur de la bande humidifiée ;
- **Sr** : Écartement entre rangs des arbres ;
- **Sp** : espacement des arbres sur les rangs.

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

$$P\% = (2 \times 2 \times 1) / (4 \times 4) = 25\%.$$

$$RFU = (0.24 - 0.12) * 1500 * (2/3) * 1.67 = 200.4 \text{ mm.}$$

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

$$D_{nette} = 200.4 * 0.25 = 50.1 \text{ mm.}$$

VI.2.1.3 Fréquence et intervalle des arrosages (Fr) :

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

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

$$Tr = \frac{50.1}{5.27} = 9.50 \text{ jours}$$

On prend Tr = 9 jours.

VI.2.1.4 Calcul de la dose brute :

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 :

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

Où :

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

$$\text{Dose brute} = \frac{B_{\text{nette}} \times Tr}{\text{Eff} \times Cu} = \frac{5.27 \times 10}{0.9 \times 0.9} = 65.06 \text{ mm}$$

VI.2.1.5 Durée de fonctionnement par d'arrosage :

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

- **Sr** : Écartement entre rangs des arbres ;
- **Sa** : espacement des arbres sur les rangs ;
- **n** : nombre du goutteur ;
- **Qg** : le débit du goutteur (4 l/h).

$$\theta = \frac{65.06 \times 4 \times 4}{2 \times 4} = 130.12 \text{ heures/mois}$$

VI.2.1.6 Durée d'arrosage journalier :

La formule pour calculer la durée d'arrosage journalier est la suivante :

$$\theta_j = \frac{\theta}{Tr} \dots (IV.9)$$

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

$$\theta_j = \frac{130.12}{10} = 13 \text{ h/jour.}$$

VI.3. Calculs hydrauliques :

- Surface : 2 ha ;
- Longueur de la rampe : 103 m ;
- Largeur de la porte rampe : 194 m.

VI.3.1. 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 :

$$q = K \cdot H^x \dots (\text{VI.10})$$

- **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 :

$$\frac{\Delta q}{q} = x \cdot \frac{\Delta H}{H} \dots (\text{VI.11})$$

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

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

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.3.2. 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 :**

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

- **Pour le porte-rampe :**

$$\varnothing_{Pr(cal)} = \left(\frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(Pr)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} \dots (VI.13)$$

Avec :

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

VI.3.2.1 Nombre d'arbre par hectare :

La formule pour calculer le nombre d'arbre par hectare est la suivante :

$$N_{arb/h} = \frac{1ha}{s_a * Sr} \dots (VI. 14)$$

L'application des données précédentes à l'équation permet d'aboutir au résultat suivant:

$$N_{arb/h} = \frac{10000}{4 * 4} = 625 \text{ arbres.}$$

VI.3.2.2 Nombre d'arbre par rampe :

Le nombre d'arbres par rampe se calcule selon la formule suivante :

$$N_{arb/r} = \frac{L_r}{s_a} \dots (VI.15)$$

- **N_{arb/r}** : Le nombre d'arbres,
- **L_r** : longueur de la rampe,

- S_a : espacement des arbres sur la rampe.

$$N_{arb/r} = \frac{l_r}{S_a} = \frac{103}{4} = 25.75 = 26 \text{ arbres.}$$

VI.3.2.3 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.

$$N_g = N_{arb/r} * 2 = 52 \text{ goutteurs}$$

- N_g : nombre de goutteurs,
- $N_{arb/r}$: Le nombre d'arbres.

VI.3.2.4 Débit de la rampe :

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

$$Q_r = N_g * Q_g \dots \text{(VI.16)}$$

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

$$Q_r = N_g * Q_g = 52 * 4 = 208 \text{ l/h}$$

VI.3.2.5 Diamètre calculé de la rampe :

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

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

Avec :

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

$$\varnothing_{r(cal)} = \left(\frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(r)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = \left(\frac{1.2 \times 2.75}{0.478 \times 208^{1.75} \times 103} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = 12.62 \text{ mm}$$

On normalise D = 20 mm.

VI.3.2.6 Nombre de rampes :

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

$$N_r = \frac{l_{pr}}{S_r} \dots (VI.17)$$

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

$$N_r = \frac{l_{pr}}{S_r} = \frac{194}{4} = 48.5 = 49 \text{ rampes.}$$

VI.3.2.7 Débit de la porte rampe :

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

$$Q_{pr} = N_r * Q_r \dots (IV.18)$$

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

$$Q_{pr} = 49 * 208 = 10192 \text{ l/h.}$$

VI.3.2.8 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).

$$\emptyset_{Pr(cal)} = \left(\frac{Pdc(r) \times 2.75}{0.478 \times Q(Pr)^{1.75} \times L(r)} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = \left(\frac{0.6 \times 2.75}{0.478 \times 10192^{1.75} \times 103} \right)^{-\frac{1}{4.75}} = 61.26 \text{ mm}$$

On normalise D = 90mm.

VI.3.2.9 Vérification des pertes de charges :

Une fois les diamètres des conduites choisis (16 mm pour les rampes et 90 mm pour les porte-rampes), une vérification des pertes de charge est effectuée à l'aide de la formule de Hazen-Williams. Cette dernière permet de calculer les pertes de charge en fonction des caractéristiques hydrauliques du réseau.

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

$$\Delta H_L = \left(\frac{3.592}{CH_w} \right)^{1.852} * \frac{L}{D^{4.87}} * Q^{1.852} \dots \text{(VI.19)}$$

- ΔH_L : Perte de charge en m.
- CH_w : Coefficient de Hazen-Williams = 130.
- L : Longueur de la conduite.
- D : Diamètre de la conduite.
- Q : Le débit de porte rampe.

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	103	20	0.06	0.38
la porte rampes	194	90	2.83	0.59
Tete de secteur	10	90	2.83	0.03
Total	/	/	/	1

Les pertes de charge totale sont de l'ordre de 1m donc inférieur à 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 : Orge grain,
- Temps de travail : 20 heures par jour et 26 jours par mois,

- Superficie : 1 Ha,
- Longueur : 100 m,
- Largeur : 100 m,
- Alimentation en eau : Borne N°2,
- Pression disponible : 32.02bars,
- Perméabilité de sol : 15 mm/h,
- Besoins de pointes : 144.28 mm/mois pour le mois d'Mars.

VI.4.2. Calcul de la dose pratique :

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

$$D_p = (H_{cc} - H_{pf}) * Y * Z * d_a$$

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 :

$$D_p = 80.16 \text{ mm}$$

VI.4.3. Dimensionnement de l'asperseur :

VI.4.3.1 Choix du diamètre de la buse :

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

En se référant à la fiche technique (**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:

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

Où :

- **L** : la portée en mètres,
- **d** : diamètre de la buse en millimètres,

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

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

VI.4.4. Calcul des écartements :

Selon les normes américaines, l'écartement maximal recommandé dépend de l'intensité du vent.

- Pour des vents faibles, l'espacement entre les lignes d'arrosage (E_l) est de 1,30 m.
- En revanche, en cas de vents forts, cet écartement est réduit à 1,02 m.

Quant à la distance entre les asperseurs le long de la rampe (E_a), elle est fixée à 0,80 m, quelle que soit la vitesse du vent.

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

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

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

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

La pluviométrie d'un asperseur, c'est-à-dire la hauteur d'eau appliquée par unité de surface, est déterminée à l'aide de la formule suivante :

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

Où :

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

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

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

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

VI.4.6. Détermination des paramètres d'arrosages :

VI.4.6.1 Calcul du tour d'eau :

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

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

Avec :

- B_{mp} : le besoin en eau du mois de pointe pour le blé, soit 144.28 mm ;
- N_j : le nombre de jours disponibles pour l'irrigation dans le mois, soit 26 jours.

$$Tr = \frac{\text{Dose nette} \times N_j}{B_{mp}} = \frac{80.16 \times 26}{144.28} = 14.45$$

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 :

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

Avec :

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

$$D_{brute} = \frac{144.28}{3 \times 0.75} = 64.12 \text{ mm.}$$

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 :

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

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

$$T = \frac{64.12}{7.9} = 8.12 \text{ heures}$$

On prend $T = 9$ 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:

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

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%).

$$Q_{eq} = \frac{S \times B_{mp} \times 10}{T \times n \times N_j \times E_{ff}} = \frac{1 \times 144.28 \times 10}{9 \times 2 \times 26 \times 0.75} = 4.11 \text{ m}^3/h$$

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

VI.4.7.1 Calcul de la longueur de 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 :

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

Avec :

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

$$L_r = 100 - \frac{12}{2} = 94 \text{ m.}$$

VI.4.7.2 Nombre des asperseurs par rampe :

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

$$N_{asp} = \frac{L_r}{E_a} \dots (\text{VI.28})$$

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

$$N_{asp} = \frac{L_r}{E_a} = \frac{94}{12} = 7.83$$

On prend $N_{asp} = 8$ 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 :

$$Q_r = q_{asp} \times N_{asp} \dots (\text{VI.29})$$

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

$$Q_r = 1.14 \times 8 = 9.12 \text{ m}^3/h$$

VI.4.7.4 Diamètre de la rampe :

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

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

Avec :

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

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} = \sqrt{\frac{4 \times (9.12/3600)}{\pi \times 1.5}} = 46.34 \text{ mm}$$

On normalise à $D_N = 60 \text{ mm}$.

VI.4.7.5 Calcul du la longueur du porte rampe :

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

$$L_{pr} = \text{Largeur du terrain} - \frac{E_r}{2} \dots \text{(VI.31)}$$

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

$$L_{pr} = 100 - \frac{12}{2} = 94 \text{ m}$$

VI.4.7.6 Nombre de rampes :

$$N_r = \frac{L_{pr}}{E_r} \dots \text{(VI.32)}$$

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

$$N_r = \frac{L_{pr}}{E_r} = \frac{94}{12} = 7.83$$

On prend $N_{asp} = 8$ rampes.

VI.4.7.7 Débit du porte rampe :

Nous travaillons avec une seule rampe

$$Q_{pr} = q_r \times N_r \dots (VI.33)$$

Q_{pr} : est le débit d'une rampe (en m³/s),

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

$$Q_{pr} = q_r \times N_r = 9.12 \times 1 = 9.12 \text{ m}^3/\text{h}$$

VI.4.7.8 Diamètre de la porte rampe :

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

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}}$$

Avec :

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

$$D_r = \sqrt{\frac{4 \times Q_r}{\pi \times V}} = \sqrt{\frac{4 \times (9.12/3600)}{\pi \times 1.5}} = 46.34 \text{ mm}$$

On normalise à $D_N = 75 \text{ mm}$.

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

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

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

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

- 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)	Q (l/s)	ΔH_L (m)
La rampe	94	63	2.53	1.33
La porte rampes	94	75	2.53	0.56
Tête de secteur	10	75	2.53	0.06
Total	/	/	/	1.95

Les pertes de charge totale sont de l'ordre de 1.95 m donc inférieur à 4.5 m restent dans les limites admises par la règle de Christiansen.

VI.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, deux systèmes d'irrigation adaptés à des cultures spécifiques ont été analysés : le goutte-à-goutte pour l'olivier et l'aspersion pour l'orge en grain. Le dimensionnement hydraulique a permis de déterminer les débits, les diamètres des conduites ainsi que les paramètres d'arrosage appropriés. Une attention particulière a été accordée au calcul des pertes de charge afin d'assurer un fonctionnement optimal du réseau.

Le choix d'asperseurs équipés de buses de 4,5 mm, fonctionnant à une pression de 2,5 bars, permet une répartition homogène de l'eau. L'adoption de ces systèmes favorise une gestion rationnelle des ressources hydriques et contribue à l'amélioration des rendements agricoles.

Chapitre VII : Etude technico-économique

VII.1. 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 Tarrouma (secteur 2), dont la superficie atteint 150 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 :

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

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.

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

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 :

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

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 :

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

Avec :

- **S_{htr}** : surface horizontale de la tranchée (m²)
- **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 :

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

Avec :

- V_{tr} : volume de la tranchée (en m³)
- S_{tr} : section de la tranchée (en m²)
- L : longueur totale de la tranchée (en m)

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

Tableau VII-1 : Calcul des différents volumes.

Tubes enterrés	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)	Surface vertical	Surface horizontal	Déblai (m ³)	Sable (m ³)	Conduites (m ³)	Remblai (m ³)	Transport des terres
Ø75	41.17	0.68	1.28	0.87	27.79	35.43	5.56	0.18	29.69	5.74
Ø90	987.97	0.69	1.29	0.89	681.70	879.39	136.34	6.28	736.77	142.62
Ø110	1717.9	0.71	1.31	0.93	1219.71	1597.82	243.94	16.32	1337.56	260.26
Ø125	929.88	0.73	1.33	0.97	674.16	893.27	134.83	11.41	747.03	146.24
Ø140	521.7	0.74	1.34	0.99	386.06	517.32	77.21	8.03	432.08	85.24
Ø160	242.2	0.76	1.36	1.03	184.07	250.34	36.81	4.87	208.66	41.68
Ø180	97.92	0.78	1.38	1.08	76.38	105.40	15.28	2.49	87.64	17.77
Ø250	193.1	0.85	1.45	1.23	164.14	238.00	32.83	9.47	195.69	42.30
Ø280	79.36	0.88	1.48	1.30	69.84	103.36	13.97	4.88	84.51	18.85
Ø315	216.6	0.92	1.52	1.40	198.19	300.26	39.64	16.87	243.75	56.51
Ø350	155	0.95	1.55	1.47	147.25	228.24	29.45	14.91	183.88	44.36
Ø400	414.11	1.02	1.62	1.65	423.22	686.46	84.64	57.89	543.93	142.53
Ø500	354.24	1.12	1.72	1.93	397.46	684.42	79.49	75.77	529.16	155.26
				Total	4649.96	6519.70	929.99	229.37	5360.34	1159.36

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 :

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

❖ Remblais

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

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

❖ Lit de sable

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

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

❖ Transport des terres

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

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

❖ Nivellement et compactage

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

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

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	6519.70	400.00	2607879.41
Remblais	M ³	5360.34	200.00	1072067.64
Sable	M ³	929.99	2 500.00	2324978.58
Transport des terres	M ³	1159.36	350.00	405776.11
Nivellement et compactage	ML	4649.96	150.00	697493.57
			Prix total (HT)	7108195.31
			TVA 19%	1350557.11
			Total TTC	8458752.42

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	41.17	/	PEHD	295	/	2 778.98	14 924.13
Ø90	987.97	/	PEHD	410	/	68 169.93	473 237.63
Ø110	1717.9	/	PEHD	610	/	121 970.90	1 169 889.90
Ø125	929.88	66	PEHD	780	950.00	67 416.30	855 422.70
Ø140	521.7	84	PEHD	990	950.00	38 605.80	634 413.80
Ø160	242.2	104	PEHD	1240	950.00	18 407.20	417 851.87
Ø180	97.92	149	PEHD	1775.21	1 000.00	7 637.76	330 400.49
Ø250	193.1	251	PEHD	3000	2 000.00	16 413.50	1 097 713.50
Ø280	79.36	402	PEHD	4813	2 000.00	6 983.68	1 193 110.03
Ø315	216.6	632	Fonte	7569.54	3 000.00	19 818.90	3 554 766.26
Ø350	155	627	Fonte	7516.6	3 500.00	14 725.00	3 375 639.67
Ø400	414.11	709	Fonte	8490	4 000.00	42 322.04	6 392 115.94
Ø500	354.24	900	Fonte	10800	5 000.00	39 745.73	8 365 537.73
Prix total (HT)							27 875 023.64
TVA 19%							5 296 254.49
Total TTC							33 171 278.13

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	23	12 500	28 7500
Borne A4	1	20 100	20 100
Té	22	1 230	25 830
Vanne de sectionnement	2	23 000	46 000
Vanne	11	10 890	119 790
Coude 90°	6	1 200	7 200
Prix total (HT)			507 650
TVA 19%			96 453.5
Total TTC			604 103.5

VII.6. Estimation des coûts du bassin d'aspiration et des pompes de refoulement :

Les prix d'exécution du bassin d'aspiration ainsi que les pompes de refoulement sont détaillés dans le tableau VII.5.

Tableau VII-5 : Estimation du coût du bassin d'aspiration, des pompes de refoulement.

Types des travaux	Unité de mesure	Quantités	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Déblais	M ³	750	450	337 500
Géomembrane 1.2mm	M ²	535	900	481 500
Fourniture de pose	M ²	535	100	53 500
Pompes	/	4	580000	2 320 000
Chambre pour l'armoire électrique	Forfait	1	100 000	100 000
Prix total (HT)				3 292 500
TVA 19%				625 575
Total TTC				3 918 075

VII.7. Estimation du cout de forage :

L'estimation du coût de forage est détaillée dans le tableau VII.6.

Tableau VII-6 : Estimation du cout de forage.

Désignation des travaux	Unité	Quantité prévue au marché	Prix unitaire (DA)	Montant brut total des travaux (DA)
Amenée et repli du chantier	Fft	1	600 000	600 000
Construction plateforme bassin rigoles	U	1	200 000	200 000
Construction de l'avant puits	MI	10	45 000	450 000
Forage de reconnaissance 12''1/4	MI	446	20 000	8 920 000
Amenée équipe de diagraphie	Fft	1	25 000	25 000
Enregistrement diagraphie	MI	446	1 000	446 000
Essai de nappe à blanc	H	5	20 000	100 000

Élargissement de 12''1/4 à 17''1/2	MI	300	20 000	6 000 000
Travail en conditions anormales	H	200	10 000	2 000 000
F/P Tube Plein INOX 8"5/8 Ep. 5 mm	MI	70	38 000	2 660 000
F/P Tube Crépiné JOHNSON 8"5/8 slot 20	MI	120	40 000	4 800 000
Cône de raccordement 8"5/8 à 6"	U	1	60 000	60 000

Mise en place massif filtrant	m³	30	12 000	360 000
Cimentation de l'espace annulaire	m³	5	20 000	100 000
Traitement à l'hexamétophosphate	kg	400	800	320 000
Traitement à l'acide chlorhydrique	m³	5	80 000	400 000
Développement du forage à air lift – avec FM	H	72	7 000	504 000
Développement sans FM	H	24	3 000	72 000
Chantier de pompage	Ft	1	100 000	100 000
Pompage effectif (essai de débit)	H	72	6 000	432 000
Observation remontée nappe	H	24	3 000	72 000
Analyse physico-chimique d'eau	Ft	1	60 000	60 000
Réalisation d'une endoscopie	MI	446	1 000	446 000
Rapport fin de sondage	U	2	50 000	100 000
Fermeture du forage	Ft	1	40 000	40 000
Construction abri de forage	U	1	1 000 000	1 000 000
Mur de clôture	MI	55	24 000	1 320 000
Prix total (HT)				33 613 000
TVA 19%				6 386 470
Total TTC				39 999 470

VII.8. Coût total de projet :

Le coût total du projet d'aménagement hydraulique agricole intègre notamment les équipements assurés par cinq forages, pour un montant estimatif de 220 millions de dinars, répartis comme suit :

Tableau VII-7 : Le coût total du projet.

Travaux	Montant TTC (DA)
Travaux de terrassement	8 458 752.42
Pose des conduites	33 171 278.13
Pièces spéciales	604 103.5
Bassin d'aspiration	3 918 075
5 Forages	199 997 350
Adduction totale	2 200 000 00
Coût total	266 152 209.05

Le coût global des travaux d'aménagement du périmètre est estimé à deux cent soixante-six millions cent cinquante-deux mille deux cent neuf dinars et cinq centimes (266 152 209,05 DA), conformément aux estimations issues de l'étude technique détaillée.

VII.9. Conclusion :

L'étude technico-économique de l'aménagement hydro-agricole du périmètre de Tarrouma (secteur 2), couvrant une superficie de 150 hectares, a permis d'estimer le coût global du projet à deux cent soixante-six millions cent cinquante-deux mille deux cent neuf dinars et cinq centimes (266 152 209,05 DA).

Ce montant inclut l'ensemble des travaux indispensables à la mise en œuvre du projet, notamment le terrassement, la pose du réseau de distribution, l'installation des pièces spéciales, la réalisation du bassin d'aspiration, l'acquisition des pompes, ainsi que les ouvrages d'adduction assurés par cinq forages.

Le coût moyen à l'hectare est évalué à un million sept cent soixante-quatorze mille trois cent quarante-huit dinars et six centimes (1 774 348,06 DA/ha), fournissant ainsi une base fiable pour l'analyse de la rentabilité et de la viabilité économique de l'opération.

Bien que l'investissement initial soit conséquent, le projet présente des retombées économiques et environnementales significatives. Il permettra une gestion plus rationnelle des ressources en eau, une amélioration notable des rendements agricoles, ainsi qu'une meilleure efficacité de l'irrigation, contribuant ainsi à assurer la rentabilité durable de l'aménagement.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'aménagement d'un périmètre hydro-agricole repose sur une étude technique intégrée, mobilisant des compétences en hydrogéologie, hydraulique, agronomie et économie rurale. Cette approche multidisciplinaire vise à optimiser l'utilisation des ressources naturelles, en particulier l'eau, tout en garantissant la pérennité des aménagements agricoles.

Le présent mémoire a porté sur l'étude du périmètre de Tarrouma (secteur B), situé dans la commune aride de Babar, au sud de la wilaya de Khenchela. Bien que la zone dispose de sols à bon potentiel agricole, le déficit hydrique impose une gestion rationnelle et efficiente de la ressource en eau pour soutenir un développement durable.

L'étude a abouti à la conception d'un système d'irrigation sous pression, alimenté par cinq forages profonds, un bassin de stockage et un dispositif de pompage. Ce système permet de délivrer des pressions comprises entre 2,4 et 3,32 bars au niveau des bornes d'irrigation, rendant possible l'adoption de techniques modernes comme l'aspersion et le goutte-à-goutte, bien adaptées aux conditions climatiques locales.

Le réseau d'adduction proposé vise à sécuriser l'approvisionnement en eau, à renforcer l'efficacité hydraulique et à créer un environnement technique favorable à l'intensification agricole. Ce projet constitue ainsi une opportunité concrète de dynamisation et de modernisation de l'agriculture dans les zones à climat saharien, contribuant à la valorisation durable du territoire.

Références Bibliographiques

- [1] SID Mohamed Laïd, Étude d'aménagement du cours d'eau d'Oued Baghai de la wilaya de Khenchela, Thèse de doctorat, 2024.
- [2] HOCINE, Shout, ALI, Derouiche, et FOUAD, Bouaïcha. Étude Geophysique des Aquifères Profonds Dans le Sud-Est Constantinois (Cas de la Region de Khenchela-Aures).
- [3] TEBBI Fatima Z., DRIDI Hadda, KALLA Mahdi, « Performance analysis of a reservoir in arid region. Case study: Babar reservoir, Aurès region, Algeria », Journal of Water and Land Development, 2018.
- [4] CHAFFAI, Hicham, TOUBAL, Abderrahmane, LACROIX, Michel, *et al.* HYDROGEOLOGIE D'UN SYSTEME AQUIFERE EN ZONE SEMI-ARIDE. CAS DE LA REGION DE KHENCHELA (ALGERIE). 2014.
- [5] BALLAIS Jean-Louis, « Nemencha (Le massif des) : Géographie », Encyclopédie berbère, n° 34, 2012, p. 5411–5427.
- [6] ABDELHAMID Khabtane, CHABANE Rahmoune, « Effet du biotope sur la diversité floristique et le polymorphisme phénotypique des groupements à *Tamarix africana* Poir. Dans les zones arides de la région de Khenchela (Est algérien) », Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID), vol. 106, n° 2, 2012, p. 123–137.
- [7] OUAKLI Hadjer. Etude du périmètre d'irrigation de Béni Slimane (Secteur3) 251,87 HA, à partir du barrage de Béni Slimane (W. Médéa). ENSH, 2021.
- [8] DAGHEL MOHAMED AMINE. Etude d'extension du périmètre d'irrigation d'Ain kercha partie est sur une superficie de 284 ha à Oum el bouaghi. ENSH, 2020.
- [9] J. Doorenbos ; A. Kassam. Reponse des rendements à l'eau. FAO Bulletin d'Irrigation et de Drainage (N33). 1980.
- [10] **TOUAIBIA, B.** Manuel pratique d'hydrologie. Alger .2004. 166 p

- [11] DAGHEL MOHAMED AMINE. Etude d'extension du périmètre d'irrigation d'Ain kercha partie est sur une superficie de 284 ha à Oum el bouaghi. ENSH, 2020.
- [12] OUAKLI Hadjer. Etude du périmètre d'irrigation de Béni Slimane (Secteur3) 251,87 HA, à partir du barrage de Béni Slimane (W. Médéa). ENSH, 2021.
- [13] AHBOUH, Leila et AZIEZ, Ouahiba. Cours et exercices corrigés : Drainage et Assainissement Agricole. [Polycope]. Année universitaire 2021–2022. 122p
- [14] DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU (DRE). Étude pour la réalisation de système d'irrigation des périmètres – Périmètre : TAROUMA. Khenchela. DRE, 2024.
- [15] FAO. Manuel de conception des réseaux d'irrigation sous pression. Rome : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 1997. 184 p. (Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n° 45). ISBN 92-5-203924-7.
- [16] M. BENZITA Oussama. ETUDE D'AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE DU PERIMETRE DE FENOUGHIL (SECTION A DE 400 HA) W. ADRAR A PARTIR DU FORAGE. ENSH, 2020.
- [17] FAO. Irrigation Manual* [en ligne]. Rome : FAO, 2008-2012. Disponible sur : <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8de388c3-69f3-4c6e-b46d-240a5486e93f/content> (consulté le 11 mai 2025).

Annexes

Annexe 1

χ^2 theorique

χ^2 Y	0.9	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.016	0.455	1.074	1.642	2.705	3.841	5.412	6.635	10.827
2	0.211	1.386	2.408	3.219	4.605	5.991	7.824	9.210	13.815
3	0.584	2.366	3.665	4.642	6.251	7.815	9.837	11.345	16.266
4	1.064	3.357	4.878	5.989	7.779	9.488	11.668	13.277	18.467
5	1.610	4.351	6.064	7.289	9.236	11.070	13.388	15.086	20.515
6	2.204	5.348	7.231	8.558	10.645	12.592	15.033	16.812	22.457
7	2.833	6.346	8.383	9.83	12.017	14.067	16.622	18.475	24.322
8	3.490	7.344	9.524	11.030	13.362	15.507	18.168	20.090	26.125
9	4.168	8.343	10.656	12.242	14.684	16.919	19.679	21.666	27.877

Annexe 2

La fiche technique d'un arroseur ZB de type Perrot

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	
mm	Portée en m					Distances entre arroseurs					
4,2	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	24x18	18x18	24x18	18x18	24x18	18x18
4,5	15,0	15,4	15,8	16,3	16,9	24x18	18x18	24x18	18x18	24x18	18x18
4,8	15,4	15,8	16,2	16,6	17,0	24x18	18x18	24x18	18x18	24x18	18x18
5,0	15,8	15,9	16,3	16,7	17,3	24x18	18x18	24x18	18x18	24x18	18x18
5,2	16,0	16,4	16,6	16,8	17,4	24x18	18x18	24x18	18x18	24x18	18x18
6,0	16,4	16,5	16,7	17,2	17,6	24x18	18x18	24x18	18x18	24x18	18x18
7,0**	16,8	17,0	17,2	17,3	17,8	24x18	18x18	24x18	18x18	24x18	18x18
ZB 22/ZB 22W	Consommation d'eau					Précipitations					
	(m³/h)	(m³/h)	(m³/h)	(m³/h)	(m³/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)	(mm/h)
4,2	0,99	1,09	1,17	1,26	1,33	2,3	3,1	2,5	3,4	2,7	3,6
4,5	1,14	1,25	1,35	1,44	1,53	2,6	3,5	2,9	3,9	3,1	4,2
4,8	1,30	1,42	1,53	1,64	1,74	3,0	4,0	3,3	4,4	3,5	4,7
5,0	1,41	1,54	1,66	1,78	1,89	3,3	4,4	3,6	4,8	3,8	5,1
5,2	1,52	1,67	1,80	1,92	2,04	3,5	4,7	3,9	5,2	4,2	5,6
6,0	1,89	2,07	2,24	2,39	2,54	4,7	6,3	5,1	6,9	5,6	7,4
7,0**	2,53	2,77	2,99	3,19	3,39	6,4	8,5	7,0	9,3	7,5	10,1

Annexe 3

Coefficients cultureaux (Kc)

(Bulletin FAO d'irrigation et drainage n°33 tableau 18)

CULTURE	Stades de développement de la culture					Durée totale de la période végétative
	Initial	Développement	Mi-saison	Fin de saison	Récolte	
Bananier 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 sans sarclage						0.65-0.75 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 4

Prix des conduites PEHD (Groupe CHIALI)

LISTING PRIX SPECIAL - TUBES PEHD - ENTREPRISE									PS	
APPLICATION A PARTIR DE 16/12/2023										
PN 20					PN25					
DIM Ø DIM (mm)	EPAISSR (mm)	PRIX HT ml	PRIX TTC ml	CONDMT RLX /Barres	DIM Ø (mm)	EPAISSR (mm)	PRIX HT ml	PRIX TTC ml	CONDMT RLx /Barres	
20	2.3	38.66	46.00	100ml	20	3	39.92	47.50	100ml	
25	3	52.94	63.00	100ml	25	3.5	57.14	68.00	100ml	
32	3.6	77.31	92.00	100ml	32	4.4	92.44	110.00	100ml	
40	4.5	119.75	142.50	100ml	40	5.5	138.66	165.00	100ml	
50	5.6	187.39	223.00	100ml	50	6.9	226.89	270.00	100ml	
63	7.1	294.12	350.00	100ml	63	8.6	348.74	415.00	100ml	
75	8.4	420.17	500.00	100ml	75	10.3	495.80	590.00	100ml	
90	10.1	600.84	715.00	100ml	90	12.3	705.88	840.00	100ml	
110	12.3	907.56	1 080.00	50ml	110	15.1	1 067.23	1 270.00	100ml	
125	14	1 134.45	1 350.00	12ml	125	17.1	1 344.54	1 600.00	12ml	
160	17.9	1 899.16	2 260.00	12ml	160	21.9	2 235.29	2 660.00	12ml	
200	22.4	2 899.16	3 450.00	12ml	200	27.4	3 445.38	4 100.00	12ml	
250	27.9	4 495.80	5 350.00	12ml	250	34.2	5 336.13	6 350.00	12ml	
315	35.2	7 310.92	8 700.00	12ml	315	43.1	8 571.43	10 200.00	12ml	
400	44.7	11 680.67	13 900.00	12ml	400	54.7	14 369.75	17 100.00	12ml	
500	55.8	18 201.68	21 660.00	12ml	500		21 848.74	26 000.00	12ml	

Annexe 5

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	3.23	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									
FEVE	1.6	1.1	4	2.6	1.8	7	4.2	2	12	6.8	4.5	19	24
POIS	1.3	.9	5	2	1.3	8	3.1	2.1	12	4.9	3.2	19	17
HARICOT	1	.7	5	1.5	1	8	2.3	1.5	12	3.6	2.4	19	12
PALMIER DAT	4	2.7	4	6.8	4.5	7	10.9	7.3	11	17.9	12	19	64
FIGUIER	2.7	1.8	6	3.8	2.6	9	5.5	3.7	13	8.4	5.6	20	28
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	1.4	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
AGROCYRON	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	33
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
AGROPYRON 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