



République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur de la recherche scientifique



Université du 20 août 1955 Skikda

Faculté des sciences

Domaine des sciences de la nature et de la vie

Département des sciences agronomiques

Niveau : Master 1

Spécialité : Aménagement Hydro-Agricole (AHA)

Polycopié de cours d'irrigation sous pression et gestion des périmètres d'irrigation

Dr. MELLAL Nour El Houda

Année universitaire 2024-2025

SOMMAIRE

Préambule

Liste des figures et tableaux

	<i>Page</i>
<i>Première partie : Techniques d'irrigation sous pression</i>	
<i>Chapitre I : Généralités sur les techniques d'irrigations</i>	1
I.1. Introduction	1
I.2. Technique d'irrigation (Système d'arrosage)	1
<i>Chapitre II : techniques d'irrigations en conduites sous pression</i>	5
II.1. Définition	5
II.2. Trame du réseau	5
II.3. Classification des systèmes	7
II.4. Comparaison des méthodes sous pression et méthodes traditionnelles d'irrigation	8
<i>Chapitre III : Equipement d'irrigation et techniques de raccordement</i>	10
III.1. Introduction	10
III.2. Les conduites	11
III.3. Les raccords de conduites	14
III.4. Les dispositifs de contrôle de l'écoulement	15
III.5. Les filtres	16
III.6. Le matériel d'injection pour l'irrigation fertilisante	18
III.7. Les distributeurs d'eau	20
III.8. Les dispositifs d'automatisation	22
<i>Chapitre IV : Conception du système & programmation de l'irrigation</i>	24
IV.1. Introduction	24
IV.2. Conception du système	24
IV.3. Programmation de l'irrigation	27
<i>Chapitre V : Systèmes d'irrigation par aspersion à enrôleurs à rampes repliables</i>	32
V.1. Introduction	32
V.2. Trame du système et composantes	32
V.3. Critères et spécifications de conception	34
V.4. Spécifications particulières et programme d'irrigation	35
V.5. Coûts	36
V.6. Avantages et inconvénients	37
V.7. Exemple de projet pour une culture de luzerne	37
<i>Chapitre VI : Systèmes d'irrigation par aspersion à pivot central</i>	39
VI.1. Introduction	39
VI.2. Trame du système et composantes	39
VI.3. Avantages	41
VI.4. Inconvénients	42
VI.5. Critères et spécifications de conception	42
VI.6. Exemple de projet	44
<i>Chapitre VII : Les micro-asperseurs</i>	47
VII.1. Introduction	47
VII.2. Trame et composantes du système	47
VII.3. Les micro-asperseurs de distribution	48
VII.4. Programmation de l'irrigation	48

VII.5. Critères et considérations de conception	49
VII.6. Coûts	49
VII.7. Avantages	50
VII.8. Inconvénients	50
VII.9. Exemple de projet : Micro-asperseurs pour un champ de pommes de terre	50
Chapitre VIII : Les mini-asperseurs	53
VIII.1. Introduction	53
VIII.2. Trame et composantes du système	53
VIII.3. Les mini-asperseurs de distribution	54
VIII.4. Programmation de l'irrigation	54
VIII.5. Critères et considérations de conception	55
VIII.6. Coûts	56
VIII.7. Avantages	56
VIII.8. Inconvénients	56
VIII.9. Exemple de projet – Irrigation de citronniers par mini-asperseurs	56
Chapitre IX : Irrigation goutte-à-goutte	60
IX.1. Introduction	60
IX.2. Trame et composantes du système	60
IX.3. Les distributeurs goutte-à-goutte (Goutteurs)	61
IX.4. Gaines de micro-irrigation	62
IX.5. Tuyaux à parois poreuses	63
IX.6. Filtration	63
IX.7. Programmation de l'irrigation	63
IX.8. Critères et considérations de conception	63
IX.9. Coûts	64
IX.10. Avantages	64
IX.11. Inconvénients	65
IX.12. Exemple de projet : Irrigation goutte-à-goutte	65
Deuxième partie : Gestion des périmètres d'irrigation	
Chapitre I : Cadre général des périmètres d'irrigation	71
I.1. Introduction	71
I.2. Définition du périmètre irrigué	71
I.3. Types de Périmètres Irrigués	71
I.4. Importance des périmètres irrigués	72
I.5. Gestion des périmètres irrigués	72
I.6. Enjeux des périmètres irrigués	73
I.7. Perspectives d'avenir et innovations	73
I.8. Conclusion	74
Chapitre II : Analyse diagnostique du réseau existant	71
II.1. Introduction	75
II.2. Description du réseau existant	75
II.3. Analyse technique	75
II.4. Contraintes et dysfonctionnements	75
II.5. Perspectives	76
II.6. Conclusion	76
Chapitre III : Formulation d'un projet de réhabilitation ou de modernisation	77
III.1 Introduction	77
III.2 Diagnostic et évaluation	77
III.3 Définition des objectifs du projet	77

III.4 Choix des solutions techniques	78
III.5 Plan de mise en œuvre	78
III.6 Évaluation des impacts et perspectives	78
III.7 Conclusion	79
Références bibliographiques	

Préambule

Ce polycopié de cours d'irrigation sous pression et gestion des périmètres irrigués est conçu au profit des étudiants de master aménagement hydroagricole du domaine des sciences de la nature et de la vie, relevant de la filière sciences agronomiques de l'université du 20 août 1955 – Skikda. Il a été élaboré en conformité avec le programme officiel du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS), afin de répondre aux exigences pédagogiques et académiques en vigueur.

Ce support pédagogique présente plusieurs intérêts, tant sur le plan technique qu'économique et environnemental. Plus précisément, il permettra de :

- Planification et conception des réseaux d'irrigation en fonction des besoins des cultures et des ressources disponibles. Maîtriser les outils de calcul dans les réseaux hydrauliques,
- Optimisation de l'utilisation de l'eau pour améliorer l'efficacité de l'irrigation,
- Adaptation aux défis du changement climatique en optimisant l'efficacité hydrique,
- Intégration de l'irrigation dans une approche de gestion durable des ressources hydriques et des exploitations agricoles.

Pour suivre efficacement ce module, les apprenants doivent avoir :

- Des connaissances de base en hydraulique et hydrologie ;
- Des notions en agronomie et sciences du sol ;
- Des bases en techniques d'irrigation ;
- Des compétences en mathématiques et physique appliquée ;
- Des notions en gestion et maintenance des équipements hydrauliques ;

Alors qu'à l'issue de ce module, l'étudiant sera capable de :

- Maîtriser les principes de l'irrigation sous pression ;
- Concevoir et dimensionner un réseau d'irrigation sous pression ;
- Gérer un périmètre irrigué ;
- Évaluer l'impact environnemental de l'irrigation ;

Ce support pédagogique est scindé en deux parties : la première permet aux apprenants de se familiariser avec les différentes techniques d'irrigation sous pression ainsi que les équipements indispensables à leur mise en place. Tandis que la seconde partie est dédiée à l'organisation, l'exploitation et la gestion durable des périmètres irrigués, en prenant en compte les dimensions techniques, économiques et environnementales.

Liste des figures

Fig I.1 : Irrigation par submersion.	01
Fig I.2: Arrosage par planche	02
Fig I.3: Arrosage par rigoles de niveau	02
Fig I.4: Arrosage à la raie	02
Fig I.5: Arrosage par plans inclinés ordinaires	02
Fig I.6: Arrosage par plans inclinés en étages	02
Fig I.7: Arrosage Par Terrasses.	02
Fig I.8. Irrigation par infiltration	02
Fig I.9. Irrigation par aspersion	03
Fig I.10. Irrigation par goutte à goutte	03
Fig I.11. Irrigation par contrôle de nappe	03
Fig II.1. Schéma d'une trame de réseau	04
Fig III.1. Raccord fileté en acier	11
Fig III.2. Tuyaux et raccord en acier	11
Fig III.3. Tuyaux à raccord rapide en aluminium	12
Fig III.4. Tuyaux en PVC rigide	12
Fig III.5. Rouleaux de tuyau en polyéthylène	13
Fig III.6. Raccord de tuyau en polyéthylène	13
Fig III.7. Un rouleau de tuyau plat	14
Fig III.8. Raccords filetés pour les tuyaux en acier galvanisé	14
Fig III.9. Raccord en polyéthylène (pp)	14
Fig III.10. Raccord en PVC	15
Fig III.11. Dispositifs directionnels ou vannes	16
Fig III.12. Dispositifs de mesure	16
Fig III.14. Filtre à gravier	16
Fig III.15. Hydrocyclone	17
Fig III.16. Filtre à tamis	17
Fig III.17. Filtre à disque	17
Fig III.18. Filtres autonettoyants automatiques	17
Fig III.19. Dilueur d'engrais liquides	18
Fig III.20. Injecteur de type venturi	19
Fig III.21. Injecteur d'engrais à pompe à piston	19
Fig III.22. Asperseurs	20
Fig III.23. Micro asperseur	20
Fig III.24. Barboteur	21
Fig III.25. Goutteur	21
Fig III.26. Tuyau poreux	22
Fig III.27. Tuyau de jardin	22
Fig III.28. Electrovanne	22
Fig III.29. Dispositif de commande	23
Fig III.30. Dispositif d'arrosage automatique WIFI	23
Fig III.31. Vannes volumétriques automatiques	23

Liste des tableaux

Tableau IV.1. Valeurs de F pour des sorties multiples	26
Tableau VII.1. Longueur maximale admissible des conduites latérales	50
Tableaux VII.2 : Pressions de fonctionnement du système	52
Tableau VII.3 : Liste des équipements nécessaires pour l'installation	53
Tableau VIII.1. Programme d'irrigation par mini asperseur	56
Tableau VIII. 2.Nombre maximal de mini asperseur sur la conduite latérale	56
Tableau VIII. 3. Pression de fonctionnement de système	59
Tableau IX.1. Type de sol et rayon moyen d'épandage latéral	61
Tableau IX.3. Liste des équipements nécessaires	69

Première partie : Techniques d'irrigation sous pression

Chapitre I : Généralités sur les techniques d'irrigations

I.1. Introduction

Ce chapitre explore les principales techniques d'irrigation, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites.

I.2. Technique d'irrigation (Système d'arrosage)

I.2.1. Définition d'une technique d'irrigation

C'est le mode de transport et de distribution de l'eau d'irrigation dont le choix d'une telle technique d'irrigation est fonction de :

- La topographie du terrain ;
- La nature de la culture pratiquée ;
- La nature du sol.

I.2.2. Différentes techniques d'irrigation

Il existe différents types de techniques d'irrigation qui diffèrent en fonction de la distribution sur le terrain de l'eau obtenue à partir de la source. En général, l'objectif est de fournir de l'eau à l'ensemble du terrain de manière uniforme, de sorte que chaque plante ait le volume d'eau dont elle a besoin, ni trop, ni trop peu. Selon le mode de distribution de l'eau à la parcelle, on distingue essentiellement quatre techniques :

I.2.2.1. Irrigation de surface (gravitaire) : c'est la technique la plus ancienne. Dans ces systèmes d'irrigation, l'eau distribuée sur la parcelle, s'écoule à l'air libre à la surface du sol sous l'effet d'un simple écoulement pour l'humidifier et s'infiltrer dans le sol. Suivant la pente du terrain, la perméabilité du sol et la nature des cultures, elle peut prendre différents aspects :

I.2.2.1.1. Irrigation par submersion

Cette technique d'irrigation consiste à inonder temporairement une surface plane en la recouvrant d'une couche d'eau, permettant ainsi son infiltration



Figure I.1 : Irrigation par submersion.

jusqu'à la profondeur souhaitée. Elle est pratiquée sur des terrains plats divisés en bassins entourés de diguettes, où l'eau est apportée en fonction des besoins d'arrosage. Son principe repose sur la création d'une nappe d'eau qui sature momentanément le sol avant d'être absorbée.

I.2.2.1.2. Irrigation par ruissellement ou déversement

On parle souvent de l'irrigation par déversement lorsque l'irrigation entraîne une inondation ou un état proche de l'inondation du terrain cultivé. Historiquement, il s'agit de la méthode d'irrigation la plus utilisée sur les terres agricoles.

Irriguer par ruissellement c'est laisser couler sur une pente une mince couche d'eau, le temps qu'il faut pour que le sol soit humidifié jusqu'à une profondeur voulue.

Il y a deux Méthodes d'arrosage :

a) Méthodes naturelles

- Arrosage par planche ;
- Arrosage par rigoles de niveau ;
- Arrosage à la raie ou sillon



Fig I.2: Arrosage par planche



Fig I.3: Arrosage par rigoles de niveau

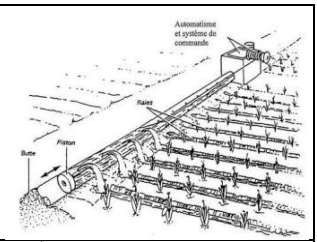


Fig I.4: Arrosage à la raie.

b) Méthodes artificielles

- Arrosage par plans inclinés ordinaires ;
- Arrosage par plans inclinés en étages ;
- Arrosage par Terrasses.



Fig I.5: Arrosage par plans inclinés ordinaires



Fig I.6: Arrosage par plans inclinés en étages



Fig I.7: Arrosage Par Terrasses.

I.2.2.1.3. Irrigation par infiltration

C'est une technique qui consiste à faire des petites rigoles (sillons) en terres aménagées dans le sens de la pente du terrain pour transporter l'eau entre les rangées de cultures.



Figure I.8 : Irrigation par infiltration.

L'eau ne ruisselle pas à la surface du sol, elle coule dans les fossés, rigoles (sillons) ou raies et pénètre par infiltration latérale jusqu'aux racines des plantes. Généralement, les plantes sont cultivées sur les billons séparant les sillons.

I.2.2.2. Irrigation par aspersion

Irrigation qui projette l'eau en l'air pour tomber à la surface du sol sous forme de fines gouttelettes (Pluie artificielle). C'est un réseau de conduites sous pression portant des asperseurs ou des buses, conçu pour projeter des jets ou pulvériser de l'eau sous forme de fines gouttes à la surface du sol.



Figure I.9 : Irrigation par aspersion.

I.2.2.3. Irrigation localisée ou micro irrigation

L'irrigation localisée est un système dans lequel l'eau est distribuée en basse pression via un réseau de canaux et qui applique une petite quantité d'eau à chaque plante ou plante adjacente.

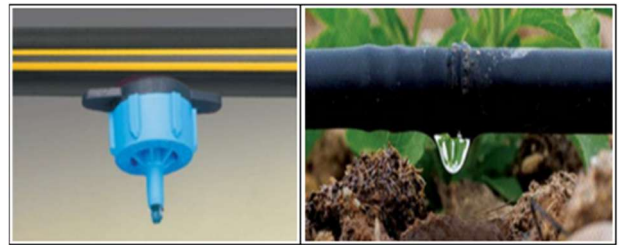


Figure I.10 : Irrigation par goutte à goutte.

Il existe plusieurs types de micro-irrigation, le plus répandu aujourd'hui étant le « goutte-à-goutte » (souvent raccourci par l'acronyme GAG), où l'eau s'égoutte lentement vers les racines des plantes par un système de tuyaux, soit en coulant à la surface du sol soit en irriguant directement la rhizosphère.

I.2.2.4. Irrigation par contrôle de nappe

L'irrigation par contrôle de nappe est une technique d'irrigation qui consiste à maintenir la nappe phréatique à un niveau suffisant pour permettre l'absorption de l'eau par les cultures par remontée capillaire.

D'après la FAO, pour réaliser le système d'irrigation par contrôle de nappe on doit disposer de :

- Un sol plat ;
- Un sol imperméable en profondeur ;

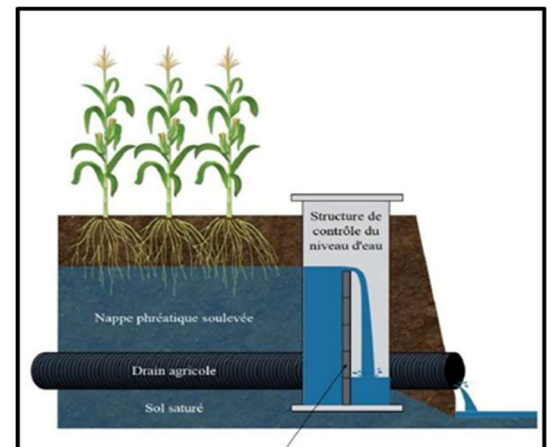


Figure I.11 : Irrigation par contrôle de nappe.

- La profondeur idéale de la nappe d'eau doit être de 30 à 60 cm en dessous de la rhizosphère ;
- Un sol avec une bonne texture.

Parfois l'irrigation a d'autres buts :

- ✓ **Lutter contre le froid** : depuis plusieurs années se développe une nouvelle méthode de lutte (aspersion d'eau) contre les gelées tardives d'avril ou de mai qui causent des dégâts considérables sur les arbres fruitiers (protection antigel efficace et économie d'eau).
- ✓ **Lutter contre les parasites** : en été, la prolifération de certains parasites est favorisée soit par la sécheresse (acariens), soit par l'humidité (maladie cryptogamique). Un choix judicieux de la méthode d'arrosage peut réduire les fréquences de traitements phytosanitaires, ce qui permet d'éviter une intervention complémentaire
- ✓ **Irrigation fertilisante (la fertigation)** : cette pratique consiste à apporter en solution dans l'eau tout ou partie de la fertilisation, afin d'éviter une intervention supplémentaire.

Chapitre II : techniques d'irrigations en conduites sous pression

II.1. Définition

Un système d'irrigation en conduites sous pression est un réseau constitué de conduites, raccords et autres dispositifs conçus et installés pour acheminer l'eau sous pression de la source jusqu'à la superficie à irriguer.

Les différences fondamentales entre l'irrigation traditionnelle de surface et les techniques d'irrigation sous pression sont :

- Le régime d'écoulement de l'eau : avec l'irrigation de surface, l'écoulement doit être important, alors qu'avec les systèmes d'irrigation en conduites sous pression, de très faibles débits, peuvent être utilisés.
- Le parcours de l'écoulement : avec les méthodes traditionnelles, l'eau d'irrigation est transportée à partir de la source et distribuée par gravité sur les champs par des canaux à ciel ouvert qui suivent les courbes de niveau. Par contre, avec les systèmes d'irrigation par conduites sous pression, l'eau est transportée et distribuée dans des conduites fermées sous pression en suivant le tracé le plus favorable (souvent le plus court), sans tenir compte de la pente ni de la topographie de la zone traversée.
- Les superficies irriguées simultanément : avec les méthodes traditionnelles d'irrigation de surface, des volumes d'eau importants sont appliqués par unité de surface, alors qu'avec les systèmes d'irrigation par conduites sous pression, l'eau est répartie en faibles débits sur de grandes surfaces.
- La pression requise : les méthodes traditionnelles d'irrigation de surface par gravité fonctionnent sans apport d'énergie externe, tandis que les systèmes d'irrigation utilisant des conduites sous pression nécessitent une pression spécifique, assurée par une unité de pompage ou un réservoir d'alimentation positionné en hauteur.

II.2. Trame du réseau

Il existe de nombreuses sortes de systèmes d'irrigation. Toutefois, un examen rigoureux des divers réseaux, de leurs équipements et de leurs principes de fonctionnement révèle une approche identique depuis la procédure de planification jusqu'à leur application et de nombreux points communs dans la plupart de leurs caractéristiques et composantes.

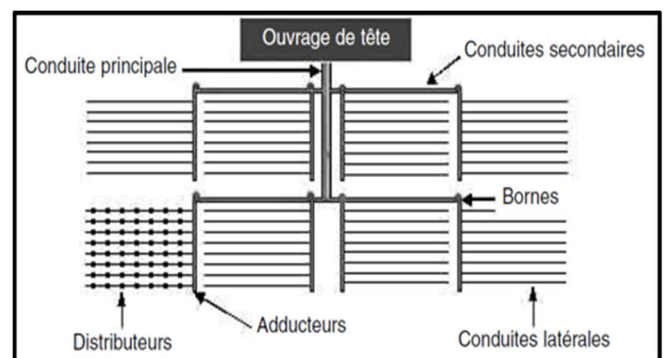


Figure II.1 : Schéma d'une trame de réseau.

Dans tous les systèmes par conduites sous pression, les principales composantes (figure II.1) sont :

- L'ouvrage de tête (unité de contrôle de la charge);
- Les conduites principales et secondaires ;
- Les bornes ;
- Les adducteurs (conduites d'alimentation);
- Les conduites latérales (tuyaux d'irrigation) avec les distributeurs.

II.2.1. Ouvrage de tête

Il comprend une ligne d'alimentation (PVC rigide ou acier galvanisé) installée horizontalement à une hauteur minimale de 60 cm au-dessus du sol. Il est équipé d'un purgeur d'air, d'une valve de contrôle, de deux prises (tuyaux de $\frac{3}{4}$ pouce) (01 pouce=2.54 cm) pour la connexion avec l'injecteur d'engrais liquide, d'une vanne de sectionnement entre les deux prises, d'un injecteur d'engrais et d'un filtre. Si un filtre à gravier ou un séparateur à sable est nécessaire, il est installé en tête de l'ouvrage.

II.2.2. Conduite principale

C'est la conduite de plus grand diamètre du réseau, qui peut transporter le débit du système dans des conditions hydrauliques favorables de vitesse du courant et de pertes de charge. Les conduites utilisées sont généralement enterrées, assemblées de manière permanente pour le PVC rigide, le polyéthylène noir à haute densité (PEHD), les tuyaux plats (type pompier), et les tubes en acier léger galvanisé avec raccord rapide, dans une gamme de diamètres de 63 à 160mm selon la dimension de l'exploitation.

II.2.3. Conduites secondaires

Ce sont des conduites de plus petits diamètres qui se branchent sur la conduite principale et qui permettent de distribuer l'écoulement vers les diverses parcelles. Elles sont du même type que les conduites principales.

II.2.4. Bornes de prise

Elles sont branchées sur les conduites principales ou secondaires et équipées d'une vanne de sectionnement (2-3 pouces). Elles fournissent une partie ou la totalité de l'écoulement aux adducteurs (conduites d'alimentation).

II.2.5. Adducteurs

Il s'agit de conduites de plus petit diamètre que les conduites secondaires, raccordées aux bornes et généralement installées en surface le long des limites des parcelles pour alimenter les conduites latérales. Tous les types de matériaux disponibles pour les conduites peuvent être utilisés pour ces adducteurs, généralement en polyéthylène haute densité (PEHD), avec un diamètre compris entre 2 et 3 pouces.

II.2.6. Conduites latérales

Ces conduites, les plus petites du système en termes de diamètre, sont raccordées aux adducteurs, perpendiculairement à des emplacements fixes, posées le long des lignes de culture et équipées de distributeurs fixés à intervalles courts et réguliers.

II.2.7. Distributeurs

Un distributeur d'irrigation est un dispositif de diverses formes, types et dimensions, conçu pour être raccordé à une conduite afin de délivrer l'eau sous pression selon différents modes : par projection en hauteur (asperseurs), par pulvérisation (mini-diffuseurs), par distribution continue en gouttes (goutteurs) ou par petits écoulements (barboteurs, vannettes, ouvertures sur conduite, tuyaux de faible diamètre, etc.).

II.3. Classification des systèmes

Les systèmes d'irrigation par conduites sous pression sont classés selon la pression requise pour leur fonctionnement, la méthode de distribution de l'eau à la plante et le type d'installation.

II.3.1. Pression de fonctionnement

La pression de fonctionnement du système est la pression hydraulique requise pour le fonctionnement normal du système, qui comprend : a) les pertes de charge dans le réseau de conduites depuis l'ouvrage de tête jusqu'à l'extrémité la plus lointaine du système ; b) la pression requise par les distributeurs ; et c) la différence d'altitude.

On distingue trois classes de systèmes sous pression :

- Les systèmes à basse pression, dans lesquels la pression requise est de 2 à 3,5 bars ;
- Les systèmes à moyenne pression, dans lesquels la pression requise est de 3,5 à 5 bars ;
- Les systèmes à haute pression, dans lesquels la pression requise est supérieure à 5 bars.

II.3.2. Méthode de distribution de l'eau

La méthode de distribution de l'eau est la manière dont l'eau est distribuée aux plantes. On distingue :

- **L'irrigation par aspersion** (au-dessus des cultures): l'eau est répartie sur toute la superficie sous la forme de gouttes de pluie. Il existe de nombreuses variantes de l'aspersion en termes de débit et de diamètre d'aspersion, de hauteur du jet au-dessus du sol (au-dessus des cultures, en dessous du feuillage), de type de mécanisme pour l'asperseur, etc. ;
- **L'irrigation de surface** (sillon, bassin, planche, etc.) : l'eau est livrée aux parcelles directement à partir des conduites principales et secondaires par les bornes. Elle est soit répartie sur l'ensemble de la superficie, soit appliquée latéralement ;
- **La micro-irrigation** (irrigation localisée) par goutteurs, mini-diffuseurs, barboteurs, micro-jets, etc. : l'eau est livrée aux plantes sans être répartie sur la totalité de la surface, mais appliquée à faible dose sur une surface limitée autour des plantes.

II.3.3. Type d'installation

On distingue trois classes de systèmes :

- Les installations fixes, où toutes les composantes sont posées ou installées à des emplacements fixes, permanents ou saisonniers ;
- Les installations semi-permanentes, où les conduites principales et secondaires sont permanentes alors que les conduites latérales sont portables, manuellement ou mécaniquement ;
- Les installations portables, où toutes les composantes sont portables.

II.4. Comparaison des méthodes sous pression et méthodes traditionnelles d'irrigation

II.4.1. Efficience de l'irrigation

Dans les réseaux de distribution par canaux à ciel ouvert, les pertes d'eau peuvent atteindre 40 % dans les canaux non revêtus et 25 % dans les canaux revêtus. Ces pertes sont dues aux infiltrations, aux plantes aquatiques et aux fuites dans les vannes, déversoirs, etc. Dans les systèmes d'irrigation sous pression, ces pertes n'existent pas. Durant l'application de l'eau aux plantes les pertes d'eau varient de 10 % en micro-irrigation à 30 % en irrigation de surface. Par conséquent, les pertes d'eau peuvent être minimisées et une efficience d'irrigation globale de 75 à 95 % peut être atteinte. Dans les canaux à ciel ouvert, l'efficience d'irrigation varie de 45 à 60 % maximum.

II.4.2. Rentabilité économique par unité de volume d'eau

Les systèmes sous pression présentent des conditions beaucoup plus favorables de manipulation de l'eau d'irrigation que ceux des canaux à ciel ouvert. Il en résulte un accroissement du rendement de 10 à 45 % et une amélioration de la qualité.

II.4.3. Fonctionnement et entretien

La main-d'œuvre requise pour le fonctionnement et l'entretien des réseaux en conduites sous pression varie entre un dixième et un quart de celle nécessaire pour les canaux à ciel ouvert. N'importe qui peut aisément faire fonctionner un réseau sous pression, alors que les canaux ouverts exigent une main-d'œuvre spécialisée. Dans les réseaux de canaux, des activités coûteuses sont requises pour éviter les dommages dus aux racines, aux infiltrations à travers les berges, à la prolifération des algues, à la sédimentation et à l'ensablement, aux blocages des prises et vannes, etc. Dans les réseaux sous pression, il n'est pas nécessaire d'entretenir ni de réparer les structures. Les composants de base des réseaux de conduites sous pression ne demandent qu'un entretien minimal durant les premières sept années. Le coût annuel de l'entretien d'un tel réseau représente environ 5 % de l'investissement initial.

Chapitre III : Equipement d'irrigation et techniques de raccordement

III.1. Introduction

Les systèmes d'irrigation comprennent diverses sortes de conduites, raccords de conduites, valves et autres équipements selon le type de système et d'installation. La plupart des installations ont des structures identiques, ce qui permet de couvrir les besoins de toute une région avec une gamme relativement réduite d'équipements.

Les différents équipements d'irrigation sont :

- Les conduites ;
- Les raccords de conduites ;
- Les dispositifs de contrôle de l'écoulement ;
- Les filtres ;
- Le matériel d'injection pour l'irrigation fertilisante ;
- Les distributeurs d'eau ;
- Les dispositifs d'automatisation ;

Les principales caractéristiques des équipements d'irrigation sont :

- Les matériaux, par exemple l'acier galvanisé, le PVC rigide, etc. ;
- Les dimensions : par exemple le diamètre nominal (DN) de la norme métrique ISO (International Organization for Standardization) en millimètres (16–160 mm) et/ou de la norme de filetage BSP (British Standard Pipe) en pouces ($\frac{3}{4}$ – 4 pouces);
- Les types de raccords et joints, par exemple à filetage, raccords rapides, soudage par solvant, etc. ;
- La pression de fonctionnement PN (pression nominale) ou PR (classe de pression) en bars, par exemple 6 bars ;
- Les normes nationales ou/et internationales conformes, par exemple DIN, ISO, BS, ASTM.

La pression de fonctionnement d'une conduite ou d'un raccord est la pression hydraulique interne maximale à laquelle la conduite ou le raccord sera soumis de manière continue en utilisation ordinaire, avec la certitude que la conduite ne connaîtra aucune défaillance. On distingue la pression nominale (PN) et la classe de pression (PR).

III.2. Les conduites

Les conduites constituent la composante fondamentale de tous les réseaux d'irrigation par conduites. De nombreuses catégories et types de conduites sont disponibles dans diverses classes de pression et diverses dimensions (diamètres). Les conduites utilisées pour les systèmes d'irrigation au niveau de la parcelle sont principalement constituées de PVC rigide ou de polyéthylène (PE). Des tuyaux en acier léger à raccord rapide et des tuyaux plats (type pompiers) sont utilisés dans une moindre mesure. Les tuyaux en acier galvanisé à raccord fileté sont peu employés. Toutes ces catégories de conduites sont décrites ci-dessous.

III.2.1. Les tuyaux en acier à raccord fileté

Les tuyaux en acier galvanisé ont été largement utilisés dans tous les pays pour toutes sortes de travaux hydrauliques. Dans le passé, ils étaient utilisés comme conduites principales et secondaires des réseaux fixes d'irrigation en conduites sous pression. En raison de leurs excellentes caractéristiques, ils étaient capables de résister aux contraintes, aux hautes pressions et de maintenir leur résistance tout au long de leur durée de vie (durée de vie moyenne de 15 à 20 ans s'ils sont posés à l'air libre et de 10 à 15 ans s'ils sont enterrés selon les propriétés du sol).

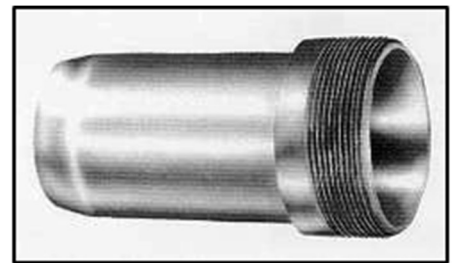


Figure III.1 : Raccord fileté en acier

Actuellement, ils sont peu utilisés en irrigation en raison de leur coût.

Ces tuyaux sont livrés en longueurs de 6 m, ils sont assemblés d'une manière permanente par des raccords filetés.

III.2.2. Les tuyaux en acier léger à raccord rapide

Ces tuyaux sont fabriqués en roulant des bandes d'acier légères galvanisées à chaud sur les deux faces.

Chaque tuyau est équipé d'un dispositif de couplage rapide à levier manuel soudé à une extrémité, alors qu'à l'autre extrémité un raccord mâle est équipé d'un joint étanche résistant à la pression. La longueur standard de ces tuyaux est de 6 m et les pressions de service (PN) varient de 12 à 20 bars. Ils sont légers à transporter,

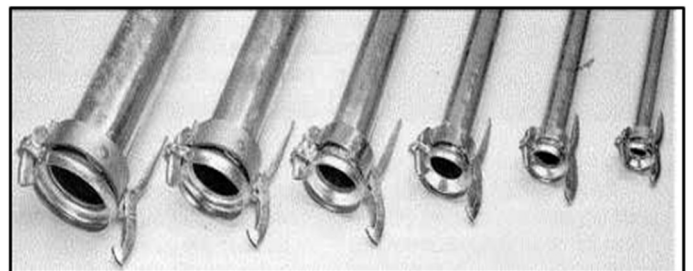


Figure III.2 : Tuyaux et raccords en acier léger galvanisé à raccord rapide

faciles à installer et à enlever et utilisés comme conduites principales et secondaires, adducteurs et conduites

latérales avec les asperseurs. Ils sont disponibles en plusieurs dimensions et en diamètres (DN) de 70, 76 et 89 mm, qui conviennent bien pour les techniques d'irrigation sous pression au niveau de l'exploitation.

III.2.3. Les tuyaux en aluminium à raccord rapide

Ces tuyaux sont principalement utilisés, toujours en surface, comme lignes latérales mobiles dans les systèmes portables d'irrigation par aspersion. Ils sont légers (environ la moitié du poids des tuyaux en acier léger), relativement solides et durables, ils sont fabriqués avec des diamètres nominaux exprimés en pouces, correspondant à des diamètres extérieurs de 2, 3, 4, 5 et 6 pouces. La pression de service minimale est de 7 bars. Ils sont livrés en longueurs standard de 6, 9 et 12 m, équipés de raccords rapides en aluminium. Ils sont soit détachables grâce à des colliers et anneaux mobiles, soit fixés en permanence sur les tuyaux, avec l'utilisation de joints en caoutchouc en forme de U, les raccords deviennent automatiquement étanches lors de la mise sous pression, et permettent la vidange des tuyaux lorsque la pression s'abaisse en dessous de 1 bar. La durée de vie de ces tuyaux est de 15 ans, à condition d'être manipulés avec soin.

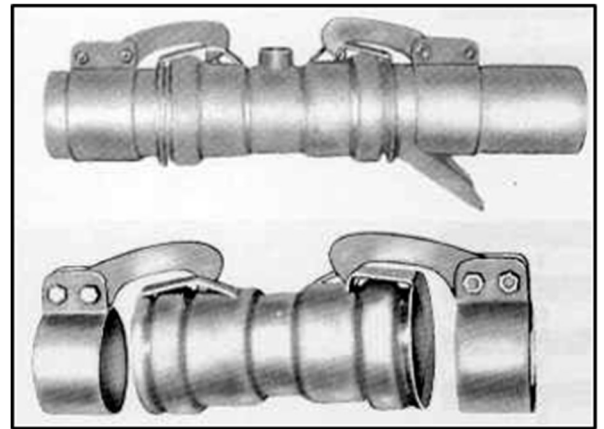


Figure III.3 : Tuyaux à raccord rapide en aluminium.

III.2.4. Les tuyaux rigides en PVC (Anglais : PolyVinyl Chloride, Français : PolyChlorure de Vinyle)

Ces tuyaux sont idéaux pour l'irrigation, le transport à froid de l'eau et les lignes de distribution principales et secondaires. Dans bien des cas, ils sont aussi utilisés comme adducteurs et conduites latérales.

Très légers, ils sont faciles à transporter et à manipuler sur place. La seule contrainte réside dans l'obligation de les garder enterrés en permanence pour les soustraire aux très basses ou hautes températures ambiantes, ainsi qu'aux radiations solaires.

La vitesse maximum d'écoulement ne doit pas excéder 1,5 m/s. Ils sont livrés en longueurs standard de 6 m et en plusieurs séries et classes de pression de service.



Figure III.4 : Tuyaux en PVC rigide

Habituellement, les tuyaux de petits diamètres jusqu'à 50 mm et les tuyaux mesurés en pouces ont une extrémité lisse et un embout préformé à l'autre bout, pour accouplement par collage avec une colle à solvant. Les tuyaux de plus grands diamètres sont munis d'un embout à emboîtement d'un côté, alors que l'autre extrémité est munie d'un embout préformé rainuré avec des parois épaissies qui reçoit un anneau d'étanchéité en caoutchouc, ce qui forme un joint mécanique intégral. Il existe une gamme complète de dispositifs de connection pour ces tuyaux, certains en PVC et d'autres en fonte ductile. La durée de vie moyenne des tuyaux enterrés en PVC est estimée à 50 ans.

III.2.5. Les tuyaux en polyéthylène (PE)

Les tuyaux en polyéthylène sont efficaces dans les techniques d'irrigation en conduites sous pression et sont prédominantes dans les systèmes de micro-irrigation. Toutes les conduites latérales avec des micro-distributeur sont des tuyaux de PEFD (résine à faible densité) de 12 à 32 mm. Les tuyaux en PEHD (résine à haute densité) de plus grands diamètres sont utilisés pour les lignes principales et secondaires et les adducteurs. Les tuyaux en PEFD sont moins affectés par les hautes températures que les tuyaux en PEHD.

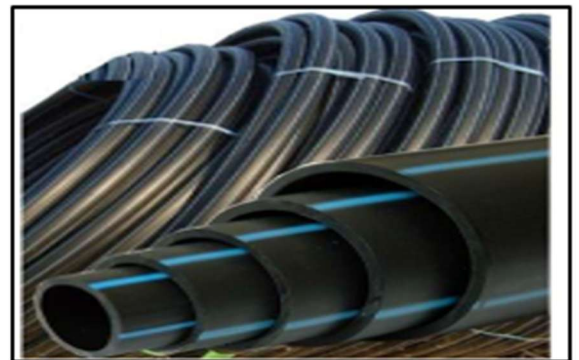


Fig III.5 : Rouleaux de tuyau en polyéthylène

Les tuyaux en PE sont fournis, munis de bouts unis, en rouleaux de 50 à 400 m, selon les diamètres. Posés en surface, ils ont une durée de vie de 12 à 15 ans. Le raccordement des tuyaux en PE est simple. Une gamme complète de raccords est disponible pour tous les diamètres et types de pression de 2 à 10 bars. Les fabricants de tuyaux en PVC et PE recommandent que la vitesse d'écoulement maximale dans ces tuyaux ne dépasse pas 1,5 m/s.



Figure III.6 : Raccord de tuyau en polyéthylène

III.2.6. Les tuyaux plats

Les tuyaux plats sont constitués avec une alternative aux tuyaux en PVC rigide pour l'utilisation en surface comme adducteurs principaux et secondaires, pour le goutte-à-goutte ou pour les autres systèmes de micro-irrigation à basse pression.

Les tuyaux plats sont souples, légers et disponibles en dimensions diverses (mm ou pouces) de 1 à 6 pouces et pour des pressions de service (PN) de 4 à 5,5 bars.

Ils sont fabriqués sans embout et fournis en rouleaux de longueur standard de 25, 50 et 100 m.

Il n'existe pas de raccords spécifiques pour les tuyaux plats. Les tuyaux sont raccordés en insérant de petits segments de tuyaux en PE, ou des raccords métalliques aux deux extrémités des tuyaux. De petits tuyaux en PE permettent de brancher les conduites latérales sur les adducteurs en tuyaux plats ; dans ce cas, des attaches en fil de fer sont fixées pour maintenir le raccord. Cependant, plusieurs industriels spécialisés en micro-irrigation ont conçu et fabriqué des raccords spéciaux pour connecter leurs lignes de goutte-à-goutte aux adducteurs en tuyaux plats.



Figure III.7 : Un rouleau de tuyau plat

III.3. Les raccords de conduites

III.3.1. La fonte ductile fileté

Ces accessoires sont conçus pour être utilisés avec des tuyaux filetés en acier galvanisé et comprennent une vaste gamme de coudes, courbes, réducteurs, prises, tés et autres.



Fig III.8 : Raccords filetés pour les tuyaux en acier galvanisé

III.3.2. Les raccords en polypropylène (PP)

Les raccords en polypropylène (PP) sont essentiellement utilisés pour les tuyaux de plastique en PE. On trouve dans tous les pays des gammes complètes de tous types, sortes, dimensions de raccords en PP.



Figure III.9 : Raccords en polypropylène (PP)

III.3.3. Les raccords en PVC

Les raccords en PVC pour conduites sont disponibles dans le système anglo-saxon (pouces) selon les mêmes règles que pour les tuyaux et raccords en métal, et dans le système métrique (en mm) conformément aux normes de dimensionnement ISO et DIN. Ils sont conçus pour être assemblés par collage, filetage ou par joint mécanique à pression intégrale.



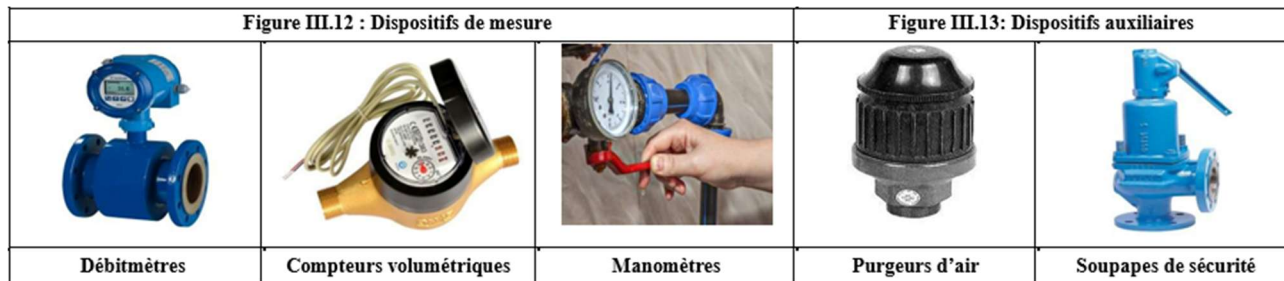
Figure III.10 : Raccords en PVC.

III.4. Les dispositifs de contrôle de l'écoulement

Par dispositif de contrôle, on entend tout dispositif installé dans un système hydraulique visant à assurer que le fluide atteigne la destination désirée au moment voulu dans les quantités requises (la valeur du débit) et avec la pression requise.

Il existe essentiellement trois catégories de dispositifs de contrôle de l'écoulement :

- **les dispositifs directionnels ou vannes** : qui servent à régler directement l'écoulement du fluide. Installés dans la conduite, ils servent à mettre en route ou arrêter l'écoulement et à fixer son débit, sa pression et sa direction. Des exemples de tels dispositifs sont les vannes de sectionnement, les vannes de contrôle et les vannes de réglage ;
- **les dispositifs de mesure** : Il est nécessaire de rassembler des informations précises sur les paramètres de l'écoulement, afin de procéder aux ajustements requis, pour atteindre les conditions d'écoulement désirées. Les débitmètres et compteurs volumétriques, ainsi que les manomètres, appartiennent à ce groupe ;
- **les dispositifs auxiliaires** : Ceux-ci n'agissent pas directement sur l'écoulement du fluide, mais permettent au système de fonctionner sans perturbation. Les purgeurs et les soupapes de sécurité font partie de ce groupe.



III.5. Les filtres

La filtration de l'eau d'irrigation est essentielle pour éviter d'endommager les distributeurs des systèmes de micro-irrigation par le bouchage. Le type de filtres utilisés dépend du type d'impuretés contenues dans l'eau et du degré de filtration requis pour les distributeurs. Leur dimension doit être la plus économique possible avec des pertes de charge minimales comprises entre 0,3 et 0,5 bar. Les différents types de filtres disponibles sont les suivants :

III.5.1. Les filtres à gravier

Ces filtres, aussi nommés filtres-médias, sont des réservoirs cylindriques fermés contenant du gravier à grain de 1,5 à 3,5 mm ou un lit de sable basaltique filtrant. Lorsque la source de l'eau d'irrigation est un réservoir ouvert, le filtre est installé avant l'ouvrage de tête du système. L'eau entrant à la partie supérieure du réservoir passe à travers le lit de gravier qui retient les grandes particules de matière organique entière, principalement des algues ; l'eau ressort par une conduite à la partie inférieure du réservoir. Les filtres sont équipés de vannes d'entrée, de sortie et de drainage, ainsi que d'un dispositif de purge à contre-courant. Le corps du filtre est en métal revêtu de résine époxy, résistant à une pression minimale PN de 8 bars ; d'un diamètre de 40 à 100 cm, il mesure de 50 à 80 cm de hauteur.

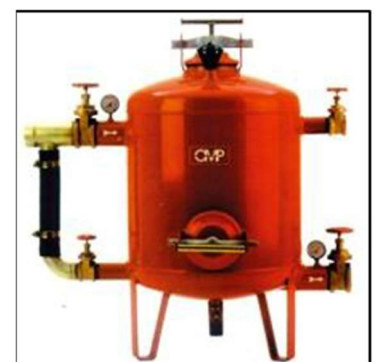


Figure III.14 : Filtre à gravier

III.5.2. Les hydrocyclones (ou séparateur de dessablage)

Ce sont des réservoirs coniques métalliques fermés, placés le cas échéant en tête de l'unité de contrôle. Ils éliminent le sable ou les autres petites particules solides des eaux de rivière ou de puits par une force centrifuge créée à l'intérieur du filtre. Cette force entraîne les solides vers le bas jusqu'à une chambre de collecte aménagée à la partie inférieure du filtre, laissant sortir l'eau filtrée. Ces filtres sont revêtus de résine époxy, fonctionnent sous une pression de service de 8 bars et sont munis de raccords filetés de 3/4 à 8 pouces.



Figure III.15 : Hydrocyclone

III.5.3. Les filtres à tamis

Ils sont utilisés en filtration finale et servent de dispositifs de protection pour les eaux de qualité moyenne ou après une filtration primaire avec un filtre à gravier ou un séparateur de sable. Ils sont installés à l'extrémité de l'ouvrage de contrôle de tête avant la conduite principale. Ils sont fabriqués en métal revêtu de résine époxy, ou en plastique de haute technologie, et se présentent sous diverses formes cylindriques (horizontale en ligne, ou à angle droit, etc.). Ils sont équipés d'éléments filtrants interchangeables perforés. Ils peuvent résister à une pression de service (PN) de 8 bars.



Figure III.16 : Filtre à tamis

Il existe aussi autres types de filtres : Les filtres à disques et les filtres auto-nettoyants automatiques



III.6. Le matériel d'injection pour l'irrigation fertilisante (fertigation)

Des engrais peuvent être mélangés avec l'eau d'irrigation au sein du réseau au moyen de dispositifs spéciaux appelés injecteurs d'engrais, installés sur l'ouvrage de tête. Il existe trois principaux types d'injecteurs d'engrais : le dilueur d'engrais fermé, l'injecteur de type Venturi et la pompe à piston. Tous sont actionnés par la force motrice de l'eau.

III.6.1. Le dilueur d'engrais liquide (fermé)

Il s'agit d'un réservoir cylindrique pressurisé, revêtu de résine époxy et résistant à la pression du système, qui est connecté par une dérivation à la conduite d'alimentation de l'ouvrage de tête. Il est réglé par la pression différentielle créée par une vanne partiellement fermée, placée sur la conduite entre l'entrée et la sortie du réservoir. Une partie de l'écoulement est dirigée vers la conduite d'entrée située au bas du réservoir, où elle se mélange avec la solution de fertilisants, puis la dilution est injectée dans le système. Le taux de dilution ainsi que le taux d'injection ne sont pas constants. La concentration d'engrais est élevée au début et devient très basse en fin d'opération.

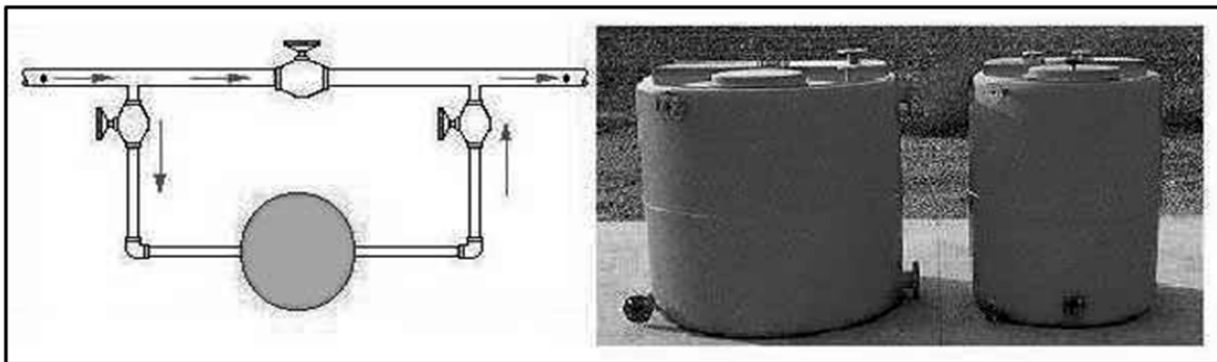


Figure III.19 : Schéma de fonctionnement et photographie d'un dilueur d'engrais liquide fermé.

III.6.2. L'injecteur de type Venturi

Ce dispositif est basé sur le principe du tube de Venturi. Une différence de pression est nécessaire entre l'entrée et la sortie de l'injecteur. Par conséquent, il est installé sur une dérivation placée sur une cuve ouverte contenant le fertilisant. Le taux d'injection est très sensible aux variations de pression et il faut parfois poser de petits régulateurs de pression pour assurer une injection constante. Les pertes de charge sont d'environ 1 bar. Ces injecteurs en plastique existent en dimensions de $\frac{3}{4}$ à 2 pouces, avec des taux d'injection de 40 à 2 000 litres par heure.



Figure III.20 : Injecteurs de type Venturi

III.6.3. La pompe à piston

Ce type d'injecteur est activé par la pression de l'eau dans le système et peut être directement installé en ligne et non sur une dérivation. L'écoulement dans le système active les pistons et l'injecteur fonctionne en injectant la solution d'engrais stockée dans une cuve tout en maintenant un taux d'injection constant. Le taux varie de 9 à 2 500 litres à l'heure selon la pression dans le système, mais il peut être réglé par de petits régulateurs. Faits de matière plastique résistante et durable, ces injecteurs sont disponibles en divers modèles et dimensions. Ils sont plus chers que les injecteurs de type Venturi.

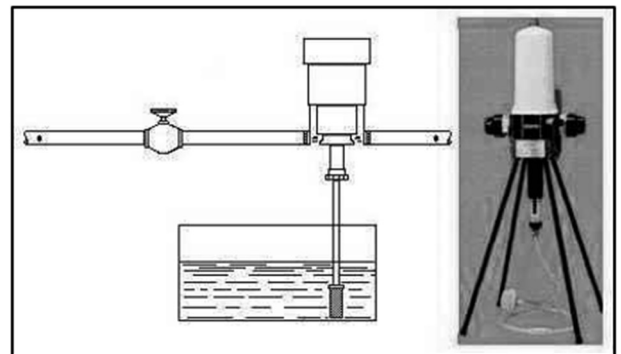


Figure III.21 : Schéma de fonctionnement et photographie d'un injecteur d'engrais à pompe à piston.

III.7. Les distributeurs d'eau

Les distributeurs d'eau définissent généralement la catégorie de système et, dans la plupart des cas, le type d'installation. Branchés sur les conduites latérales à intervalles réguliers, ils apportent l'eau aux plantes sous forme de jet de pluie, pulvérisation, faible débit, fontaine ou gouttes continues.

III.7.1. Les asperseurs

La plupart des asperseurs agricoles sont actionnés par un batteur, du type à impact rotatif lent, à buse unique ou double. L'asperseur projette en l'air des jets d'eau, qui se répandent sous la forme de gouttes de pluie sur une superficie circulaire du champ. Ces asperseurs existent en divers débits, dimensions de buses, pressions de service, et diamètres du cercle mouillé (ou diamètre de couverture), en cercle complet ou partiel. Ils sont classifiés en basse, moyenne et haute pression. Ils sont installés verticalement sur les conduites latérales, à 60 cm au-dessus du sol sur des tuyaux de rallonge de petits diamètres.



Figure III.22 : Asperseur

III.7.2. Les micro-asperseurs

Ce sont de petits asperseurs en plastique de faible capacité avec des débits inférieurs à 300 litres par heure. Leurs principales caractéristiques sont : leur vitesse rapide de rotation, moins d'une minute par rotation ; le très petit diamètre des gouttes d'eau et le faible angle du jet d'eau au-dessus de la buse. Ils n'ont qu'une buse d'environ 2 mm de diamètre. Ils ont un débit de 150 à 250 l/h sous 2 bars de pression. Ils arrosent un cercle complet d'un diamètre de 10 à 12 m. Montés sur des piquets métalliques ou plastiques de 60 cm de hauteur plantés dans le sol, ils sont connectés aux conduites latérales en PE (25 ou 32 mm) par de petits tubes flexibles de 7 mm de diamètre, longs de 80 cm. La disposition des asperseurs sur le champ est similaire à celle des asperseurs conventionnels. L'espacement ne dépasse toutefois pas 6 m.



Figure III.23 : Micro-asperseur

III.7.3. Les barboteurs

Les barboteurs à basse pression sont de petits distributeurs conçus pour l'irrigation localisée par submersion sur de petites superficies. L'eau est fournie par faibles débits au même endroit. Le débit, réglé en vissant (ou dévissant) la tête du barboteur, varie de 110 à 250 litres par heure sous une pression de 1 à 3 bars. Les barboteurs sont montés sur de petites tiges en plastique plantées en terre, et raccordés aux conduites latérales en PE par des tubes flexibles en plastique de 7 mm de diamètre et longs de 80 cm. Ils sont placés dans



Figure III.24 : Barboteur

les bassins ménagés au pied des arbres, à raison d'un ou deux pour chaque arbre. Ce bassin est toujours requis pour stocker ou contrôler l'eau, car le débit délivré par le barboteur excède habituellement le taux d'infiltration du sol.

III.7.4. Les goutteurs

Les goutteurs sont de petits distributeurs fabriqués en plastique de haute technologie. Ils sont montés à intervalles réguliers sur de petits tubes en PE mou. L'eau pénètre dans le goutteur à une pression d'environ 1 bar et est émise à pression nulle sous la forme de gouttelettes continues avec un faible débit de 1 à 2,4 l/h.



Figure III.25 : Goutteur

Les goutteurs sont caractérisés par le type de raccordement à la conduite latérale : en dérivation, c'est-à-dire inséré dans la paroi du tube à l'aide d'un poinçonneur, ou en ligne lorsque le tuyau est interrompu pour insérer le goutteur manuellement ou avec une machine. Les goutteurs à sorties multiples en dérivation sont aussi disponibles avec quatre à six sorties avec des micro-tubes de type « spaghetti ».

III.7.5. Les tuyaux poreux

Ces tuyaux sont des tubes de petits diamètres (environ 16 mm), flexibles et poreux, à paroi mince, faits de fibres de PE, de PVC ou de caoutchouc. Sous une faible pression, ils permettent à l'eau et aux engrais solubles de traverser la paroi du tube par transpiration et d'irriguer les cultures. Le débit du tube poreux n'est pas précis, car les dimensions des pores sont variables et instables. Ces tubes sont utilisés comme conduites latérales d'irrigation en-dessous de la surface du sol.



Figure III.26 : Tuyaux poreux

III.7.6. Les tuyaux de jardin

Les tuyaux de jardin flexibles sont fabriqués à partir de divers matériaux plastiques, habituellement en PVC mou, renforcés avec de la trame de textile ou de polyester. Ces tuyaux à extrémités lisses sont fabriqués en diamètres nominaux d'approximativement 15, 19, 25, 32, et 38 mm. Ils permettent une vaste gamme d'application de l'eau.



Figure III.27 : Tuyau de jardin

III.8. Les dispositifs d'automatisation

III.8.1. Les électrovannes

Ce sont des vannes automatiques qui sont commandées à distance pour ouvrir ou fermer l'écoulement de l'eau. Leur corps est conçu sur le modèle de la vanne sphérique. Elles s'ouvrent et se ferment grâce à un diaphragme flexible ou un piston. Réalisée en verre ou plastique renforcé, l'électrovanne, normalement fermée, est normalisée en pouces avec des raccords filetés et fonctionne sous une pression de 10 à 14 bars ; une poignée permet le fonctionnement manuel et le contrôle de l'écoulement.



Figure III.28 : Electrovalves

III.8.2. Les dispositifs de commande

Ce sont des dispositifs automatiques de programmation de la durée de fonctionnement qui commandent les valves automatiques (électriques) à distance, par exemple pour leur ouverture et leur fermeture selon un programme prédéterminé.

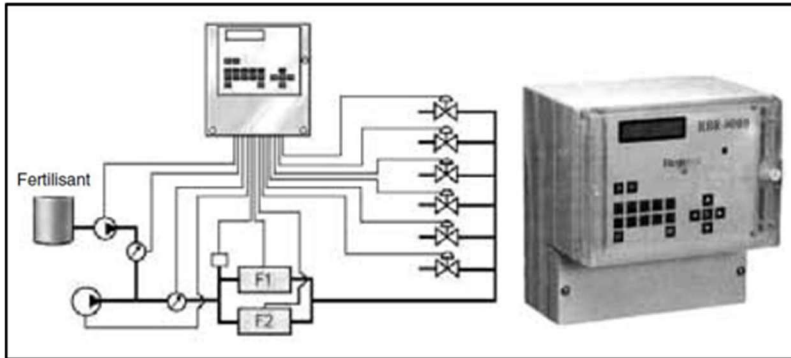


Fig III.29 : Schéma de fonctionnement et photographie d'un dispositif de commande



Fig III.30 : Dispositif d'arrosage automatique WIFI

III.8.3. Les vannes volumétriques automatiques à compteur

Ces vannes comprennent un compteur volumétrique, une commande de pilotage et un mécanisme de fermeture. Lorsque le volume prédéterminé a été distribué, la vanne se ferme automatiquement. Ces vannes n'ont qu'une application limitée, principalement en raison de leur coût élevé.



Figure III.31 : vannes volumétriques automatiques

Chapitre IV : Conception du système & programmation de l'irrigation

IV.1. Introduction

La conception technique est le second stade de la planification de l'irrigation, le premier stade concernant les besoins en eau des cultures, les types de sol, le climat, la qualité de l'eau et le programme d'irrigation. Les conditions d'approvisionnement en eau, l'électricité disponible et la topographie du terrain doivent également être considérées, de même que les considérations économiques, les disponibilités en main-d'œuvre et le niveau de compétence. Le système d'irrigation est sélectionné après une évaluation approfondie des données ci-dessus et un processus de calcul détaillé, intégrant les débits dans le système, la dose d'irrigation, la durée d'application et le programme d'irrigation.

IV.2. Conception du système

IV.2.1. Conception des conduites latérales

- longueur, direction, espacement et nombre total de lignes latérales (dans les systèmes fixes) ou positions des conduites latérales (dans les systèmes semi-permanents) ;
- *Débit dans la conduite latérale : nombre de distributeurs par conduite x débit du distributeur ;*
- *Nombre de conduites latérales fonctionnant simultanément = débit du système/débit de la conduite latérale ;*
- *Nombre de tours pour réaliser une irrigation = nombre total de lignes latérales ou positions ÷ nombre de conduites latérales fonctionnant simultanément ;*
- *Durée d'application = dose d'irrigation en mm ÷ taux d'application en millimètres par heure.*

Il est important de comprendre les fonctions et les principes de fonctionnement des distributeurs d'eau avant de commencer le processus de conception.

L'une des principales caractéristiques de tous les types de distributeurs est la relation entre le débit et la pression de fonctionnement, habituellement exprimée par la formule empirique :

$$q = k d H *$$

D'où :

q : Le débit du distributeur ;

k et d sont des coefficients (constantes) ;

H est la pression au niveau du distributeur ;

* est un exposant caractérisé par le régime d'écoulement dans le distributeur et la courbe de variation du débit en fonction de la pression.

Afin d'assurer une bonne uniformité de l'application d'eau au niveau du champ, les variations de débit des distributeurs doivent être minimales, et en aucun cas supérieures à 10 %. Ce critère a été établi par J.Christiansen pour les asperseurs, mais est actuellement appliqué à tous les systèmes sous pression.

En règle générale, la différence de pression maximale admise entre deux distributeurs qui fonctionnent ne doit pas être supérieure à 20 %. Les conduites latérales avec distributeurs doivent être dimensionnées de manière à ce que la perte de charge (pression) due au frottement dans la conduite latérale ne dépasse pas 20%.

La perte de charge due au frottement dans les conduites latérales est fournie par un graphique ou un tableau. La valeur donnée indique normalement une perte de charge en mètres ou pieds par 10 mètres ou 100 pieds de conduites.

Par exemple, pour une conduite latérale d'aspenseurs à raccord rapide de 50 mm de diamètre transitant un débit de 15 m³/h, les pertes de charge sont de 7 %. Pour une conduite latérale de 120 m, les pertes de charge sont de $7/100 \times 120 = 8,4$ m. Mais cette perte correspond à un débit total de 15 m³/h parcourant la totalité des 120 m de la conduite latérale. Cela ne correspond donc pas à la réalité car le débit diminue en route après chaque distributeur. Afin de prendre en compte les pertes de charge réelles, la valeur ci-dessus est multipliée par F, le coefficient de réduction de Christiansen, pour compenser les débits distribués en route par la conduite latérale. Les valeurs de F dépendent du nombre de distributeurs uniformément répartis le long de la conduite (tableau IV.1).

Tableau IV.1. Valeurs de F pour des sorties multiples

Nombre de sortie	F (m=2)	Nombre de sortie	F (m=2)
1	1	12	0.376
2	0.62	15	0.367
3	0.52	20	0.36
4	0.47	24	0.355
5	0.44	28	0.351
6	0.42	30	0.35
7	0.44	40	0.345
8	0.4	50	0.343
9	0.39	100	0.338
10	0.385	>	0.333

Trois différentes séries de valeurs de F existent, correspondant à l'exposant (m) de la valeur de Q, qui varie dans les formules de Hazen Williams (1,85), Scobey (1,9) et Darcy Weisbach (2). En outre, on prend les valeurs les plus basses si la distance de la première sortie équivaut à la moitié de l'espacement des distributeurs. Les différences entre les diverses valeurs de F sont toutefois quasi-négligeables.

En supposant qu'il y ait dans l'exemple ci-dessus dix distributeurs sur la conduite latérale, la valeur de F est de 0,385. Ainsi, pour une conduite latérale à raccord rapide de 50 mm de diamètre transitant un débit de 15 m³/h, avec 10 aspenseurs distribuant 1,5 m³/h avec une pression de 2 bars, les pertes de charge sont de $7/100 \times 120 \times 0,385 = 3,234$ m.

Cette valeur ne doit pas excéder le maximum autorisé, qui est de 20 % de la pression moyenne de fonctionnement de l'aspenseur, c'est-à-dire 2 bars \times 0,20 = 0,4 bar, soit 4 m sur terrain plat. Lorsque la conduite

latérale est en pente descendante, la différence de niveau s'additionne à la perte de pression maximale admissible. A l'inverse, en cas de montée, la différence de niveau est déduite.

IV.2.2. Les adducteurs, conduites principales et secondaires

À partir des adducteurs, qui peuvent également être des conduites principales ou secondaires, plusieurs rampes latérales peuvent être alimentées simultanément. Le débit sur ces conduites est distribué en route, comme sur les rampes portant des distributeurs. Par conséquent, lorsque l'on détermine les pertes de charge dues au frottement, il faut également appliquer le coefficient de réduction F de Christiansen.

Exemple : adducteur de 120 m en tube de PEHD de 75 mm, 6 bars, 16,3 m³/h, 6 rampes latérales fonctionnant simultanément : la perte de charge à plein débit est de 3,3 %, soit 4 m x 0,42 = 1,7 m environ.

Les conduites principales et secondaires et toutes les bornes sont dimensionnées de telle façon que les pertes de charge n'excèdent pas environ 15 % de la charge dynamique totale requise à la tête du réseau de conduites.

Un autre élément important est la vitesse de l'écoulement dans les conduites principales et secondaires ainsi que dans les bornes, qui doit toujours être maintenue en-dessous de 1,7 m/s dans les tubes en plastique et à 2 m/s maximum dans les autres tuyaux (aluminium, acier, etc.).

De la formule du débit $V = Q/A$, le diamètre intérieur du tube peut être déterminé pour un débit donné :

$$\text{Diamètre} = \sqrt{\frac{Q}{V}} \times 1,88$$

IV.2.3. Ouvrage de tête

Les composantes de l'ouvrage de tête et leurs dimensions sont sélectionnées en fonction des besoins du système. Dans les systèmes de micro-irrigation, les ouvrages de tête sont munis de filtres et d'injecteurs de fertilisants, alors qu'en aspersion et en irrigation par tuyaux, ces ouvrages sont simples avec un équipement minimal. Les pertes de charge dans les diverses composantes de l'ouvrage peuvent varier de 3 à 10 m.

Les formules de perte de charge sont empiriques et incluent de nombreuses variables et facteurs correctifs.

IV.2.4. Charge dynamique totale du système

La charge dynamique totale requise pour le fonctionnement normal du système est la somme des pressions au distributeur, pertes de charge dans (la conduite latérale ou rampe, adducteur, conduites principales et secondaires, vannes, raccords et petites pertes diverses), différence d'altitude (en + ou -) et pertes de charge dans l'ouvrage de tête.

IV.2.5. Charge dynamique totale de l'unité de pompage

Cette charge est la somme de la charge totale dans le système plus la hauteur de pompage. La formule de la

puissance au frein est :
$$BHP = \frac{Q \times TDH}{270 \times e1 \times e2}$$

Avec :

Q : le débit en m³/h,

TDH : la charge dynamique totale en mètres,

e1 : l'efficacité de la pompe entre 0,5-0,8 ;

e2 : l'efficacité du moteur ;

- Efficacité d'un moteur électrique : 0,7 – 0,9 ;
- Efficacité d'un moteur diesel : 0,5 – 0,75.

270 : une constante pour les unités métriques.

IV.3. Programmation de l'irrigation

La programmation de l'irrigation est l'un des facteurs qui influence la viabilité agronomique et la viabilité économique des petites exploitations, aussi important pour économiser l'eau que pour accroître les rendements des cultures. L'eau d'irrigation est appliquée aux cultures selon des programmes prédéterminés, basés sur la gestion de : • l'état de l'eau dans le sol • les besoins en eau des cultures.

Le type de sol et les conditions climatiques ont un effet significatif sur les principaux aspects pratiques de l'irrigation, qui sont la détermination de la quantité d'eau à distribuer et le moment auquel elle doit être appliquée à une certaine culture.

En plus des facteurs de base liés à la préparation des programmes d'irrigation étudiés ci-dessous, d'autres éléments importants doivent être aussi considérés, tels que la tolérance des plantes et la sensibilité au déficit en eau à différents stades de croissance, ainsi que l'utilisation optimale de l'eau.

IV.3.1. Relations eau – sol

La relation entre le sol et l'eau est complexe et dynamique. Elle dépend de plusieurs facteurs qui influencent la manière dont l'eau interagit avec le sol. Cela a des implications directes pour l'agriculture, l'irrigation, la gestion des ressources en eau, et la durabilité des écosystèmes.

Exemple

La capacité au champ (CC) d'une couche de sol de 45 cm est de 18 %. Quelle est la quantité d'eau contenue dans cette couche en m³/ha ?

Réponse

$$CC = 18\%, WP = CC \div 1,85 = 9,7\%, Sa = 18 - 9,7 = 8,3\%;$$

$$\text{Densité en vrac} = 1,2 \text{ g/cm}^3; Sa \text{ mm/m} = 8,3 \times 1,2 \times 10 = 99,6, Sa \text{ mm/45 cm} = 8,3 \times 1,2 \times 10 \times 0,45 = 44,8 \text{ mm};$$

$$m^3/ha = 0,0996 \div 1 \times 0,45 \times 10\ 000 (1 \text{ ha}) = 448,2, \text{ ou en } m^3/ha = Sa \text{ (mm/m)} \times \text{profondeur de la couche (m)} \times 10.$$

Par conséquent, la quantité d'eau est de 448,2 m³/ha.

IV.3.2. Profondeur effective d'enracinement

Il s'agit de la profondeur de sol dans laquelle les plantes puisent environ 80 % de leurs besoins en eau, principalement par la partie supérieure la plus dense du système racinaire. La profondeur d'enracinement dépend de la physiologie de la plante, du type de sol et de la disponibilité en eau.

En général, les légumes (pois, tomates, pommes de terre, oignons, arachides, concombre, etc.) ont des racines peu profondes, de l'ordre de 50 à 60 cm. Les arbres fruitiers, le coton et quelques autres plantes ont un enracinement moyen de 80 à 120 cm. En outre, l'enracinement varie en fonction de l'âge de la plante.

IV.3.3. Déficit admissible ou tarissement de l'eau disponible dans le sol

La fraction de l'humidité du sol qui équivaut à 20 à 70 % de l'humidité totale (Sa) et est facilement absorbée par les plantes (sans aucun stress provoquant une réduction de rendement,) est appelée l'humidité facilement utilisable. C'est le produit de Sa par p, qui représente le tarissement maximal admissible de l'eau disponible.

La valeur de p varie en fonction du type de plante, de la profondeur des racines, des conditions climatiques et des modes d'irrigation, elles varient de 0,25 pour les cultures sensibles à faible enracinement à 0,70 pour les cultures tolérantes à racines profondes.

IV.3.4. Profondeur nette d'application de l'irrigation

L'irrigation doit être appliquée lorsque le pourcentage admissible p d'humidité disponible (S_a) est épuisé dans la profondeur d'enracinement, c'est-à-dire quand elle doit réalimenter l'eau épuisée. Par conséquent:

Profondeur nette de la dose d'irrigation d en mm = $(S_a \times p) D$

Où: S_a = humidité disponible en mm par mètre, p = tarissement admissible, et D = profondeur d'enracinement en mètres.

Exemple :

Si $S_a = 99$ mm/m, $p = 0,5$, $D = 0,4$ m, quelle est la dose d'irrigation nette qui compensera le déficit d'humidité ?

$$d = 99 \times 0,5 \times 0,4 = 19,8 \text{ mm.}$$

IV.3.5. Besoins en eau des cultures

La quantité d'eau qui s'évapore des sols humides et des végétaux, y compris la transpiration des plantes, est nommée l'évapotranspiration (ET). Sa valeur est largement conditionnée par les facteurs climatiques, comme la radiation solaire, la température, l'humidité et le vent, ainsi que par l'environnement. L'évaporation représente environ 10 % de l'évapotranspiration totale et la transpiration des plantes les 90 % restants. Les besoins en eau des cultures englobent la quantité d'eau totale utilisée pour l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration de référence (E_{To}) représente le taux d'évapotranspiration d'herbe haute de 8 à 15 cm, dans des conditions idéales, avec une couverture végétative couvrant entièrement le terrain. C'est une valeur moyenne qui s'exprime en mm/jour sur une période de 10 à 30 jours.

Il faut, pour pouvoir corrélérer l' E_{To} aux besoins en eau des cultures (E_{Tc}), définir le coefficient cultural spécifique (k_c):

$$E_{Tc} = E_{To} \times k_c.$$

Le coefficient cultural (k_c) dépend de la surface de la feuille de la plante, de sa rugosité, de son stade de croissance, de la saison culturale et les conditions météorologiques.

IV.3.6. Pluies efficaces

Dans beaucoup de régions, les précipitations saisonnières (P) peuvent couvrir une partie des besoins en eau durant la saison d'irrigation. La quantité d'eau pluviale retenue dans la zone racinaire est nommée pluie efficace (P_e) et doit être déduite des besoins totaux calculés en eau d'irrigation. On peut estimer P_e approximativement de la manière suivante :

$$P_e = 0,8 P \text{ si } P > 75 \text{ mm/mois;} \quad P_e = 0,6 P \text{ si } P < 75 \text{ mm/mois.}$$

IV.3.7. Couverture végétale

Un autre élément à considérer lorsqu'on estime les besoins en eau des cultures est le pourcentage de la surface du champ (terrain) couvert par la culture. Un coefficient de réduction (k_r) est appliqué au calcul conventionnel de l'ET de la culture. Ce facteur est légèrement supérieur, d'environ 15%, au sol réellement couvert par la culture. Par exemple, si le sol réellement couvert par la culture est de 70%, $k_r = 0,70 \times 1,15 = 0,80$

IV.3.8. Intervalle d'irrigation ou fréquence

Il s'agit du nombre de jours entre deux irrigations consécutives : $i = d \div ET_c$, où d = la profondeur nette d'application de l'irrigation en mm (dose) et ET_c est l'évapotranspiration journalière de la culture en mm/jour. Exemple : Si $d = 19,8$ mm et $ET_c = 2,5$ mm/jour, $i = 19,8 \div 2,5 = 8$ jours.

IV.3.9. Efficacité d'application de l'irrigation

La quantité d'eau à stocker dans la zone racinaire correspond à la dose nette d'irrigation (d). Toutefois, durant l'irrigation, des quantités importantes d'eau se perdent par évaporation, infiltration, percolation profonde, etc. La quantité perdue dépend de l'efficacité du système. L'efficacité d'application de l'irrigation

$$(E_a) \text{ s'exprime par : } E_a = \frac{d}{\text{dose brute}} \times 100$$

Avec :

d : l'eau stockée dans la zone racinaire.

Exemple

La dose nette d'irrigation (d) pour une surface de 1 ha est de 19,8 mm, c'est-à-dire 198 m³. Le volume d'eau distribué durant l'irrigation est de 280 m³. Quelle est l'efficacité d'application ?

Réponse : $E_a = 198 \div 280 = 70,7 \%$. Les 30 % restants de l'eau appliquée sont considérés comme perdus.

Chapitre V : Systèmes d'irrigation par aspersion à enrouleurs à rampes repliables

V.1.Introduction

Le système d'irrigation par aspersion à enrouleurs à rampes repliables est un système mécanisé complètement automatique, aisé à transporter d'un champ à l'autre (figure V.1). La rampe d'aspersion, montée sur un chariot muni de roues à une hauteur de 1,3 à 2,5 m au-dessus du sol, est traînée à l'extrémité du champ jusqu'à 400 m du corps principal de l'engin (un bâti surmonté d'un tambour) qui reste près de la borne. Le chariot est relié au bâti par un long tuyau en PE posé sur le sol. Pendant le fonctionnement, le tuyau s'enroule sur le tambour fixé sur le corps principal en tractant vers l'arrière le chariot avec la rampe mobile qui irrigue une bande de terrain, jusqu'à ce que toute la longueur du champ soit couverte. Les rampes repliables d'aspersion sont des systèmes compacts opérant à basse/moyenne pression (3 à 4,5 bars).



Fig V.1 : Rampe d'aspersion en service sur son chariot.

La superficie irriguée par tour (secteur) est de l'ordre de 0,4 à 2 ha selon la dimension de l'unité. Ces systèmes sont utilisés pour l'irrigation des fourrages, céréales, pommes de terre, arachides ainsi que la plupart des cultures industrielles de plein champ ; ils sont beaucoup employés pour l'irrigation supplémentaire des céréales (blé et orge) durant les mois d'hiver.

V.2. Trame du système et composants

Une rampe équipée de buses d'aspersion rotatives à basse pression vaporise l'eau d'irrigation au-dessus des plantes. La rampe est une simple conduite mobile d'aspersion suspendue au-dessus du sol. Elle est montée sur un chariot roulant et alimentée par un long tuyau flexible en PE raccordé à un gros tambour d'enroulement, placé sur un bâti à base pivotante montée sur roues (figure V.2). Celui-ci est équipé d'un dispositif de commande et d'autres systèmes optionnels



Fig V.2 : La rampe, le tuyau en PE et le bâti à tambour.

assurant un bon fonctionnement du système. Pour l'installation, tout l'équipement est traîné par un petit tracteur agricole, puis connecté à une borne ou toute autre source d'eau sous pression. Le chariot avec la rampe pliée

ou déployée est tracté jusqu'au bout du champ à irriguer sur toute la longueur du tuyau flexible, en général 400 m au maximum.

Le système se déplace avec la pression hydraulique ; la pression est transmise de la turbine centrale du système au tambour enrouleur par un entraînement à chaîne et une boîte de vitesse. Pendant le fonctionnement, le tambour actionné par la turbine tire automatiquement le chariot avec la rampe sur une large bande de terrain à irriguer, en enroulant le tuyau sur le tambour. La vitesse de tractation est réglable, entre 2 et 60 m/h.

Lorsque le tuyau est complètement rétracté, le tambour cesse automatiquement l'enroulage. Le bâti à base pivotante peut être tourné (180° maximum) et la rampe avec son tuyau d'aspersion orientée dans une autre direction, pour irriguer une nouvelle zone du même champ. Ensuite, toute l'unité peut être déplacée jusqu'à une autre parcelle ou stockée.

V.2.1. La rampe avec les distributeurs (mini-diffuseurs) et le chariot mobile

La conduite de la rampe comprend des tubes pliables en acier galvanisé au zinc à chaud de 2 à 3 pouces (50–80 mm) de diamètre et d'environ 4 m de longueur, avec des diamètres réduits aux 2 extrémités. La rampe est montée sur un chariot à 2 ou 4 roues selon la dimension des rampes, construit en acier et aluminium de haute qualité, équipé de supports pivotants avec dispositifs de blocage pour le transport de la rampe. Celle-ci est suspendue au-dessus du sol entre 1,3 et 2,5 m du sol.



Fig V.3 : Mini-diffuseurs en cercles complets et demi-cercles

La rampe peut facilement et rapidement être repliée ou déployée par un seul opérateur, sa longueur totale variant entre 15 et 50 m selon le modèle. Des buses d'extrémité ou des asperseurs rotatifs à impact montés sur les deux bras de la rampe peuvent accroître significativement la largeur effective d'arrosage (figure V.3). La dimension des buses varie de 2 à 5 mm et la pression de fonctionnement de 0,7 à 2,5 bars, avec des débits compris entre 100 l/h et 4 500 m³/h; les buses, qui peuvent fonctionner en demi-cercle (180°) ou cercle complet (360°), sont placées à la partie inférieure de la conduite, face au sol, à des intervalles de 1,5 à 2 m pour un recouvrement efficace. A proximité du bâti, des asperseurs à déflecteur en demi-cercle avec portée de jet réduite sont installés pour diriger l'aspersion devant la rampe, hors des roues, afin d'éviter leur engorgement dans des sols submergés, ce qui permet le retour du système sur un sol sec.

V.2.2. Le tuyau flexible en polyéthylène

Ce tuyau est fait de PEHD vierge spécial renforcé, résistant à de hautes pressions minimales de 10 bars. Il est conçu spécialement pour les machines à tambour d'enroulement et son diamètre varie de 75 à 110 mm selon le système, pour une longueur de 300 à 500 m. Une extrémité est branchée au tambour, l'autre à la rampe. Ce tuyau assure le transit de l'eau d'irrigation et l'alimentation de la conduite de la rampe.

V.2.3. Le bâti à tambour

Selon le modèle et les dimensions, le bâti, constitué de trains de roulement de construction lourde à deux, trois ou quatre roues, comprend un châssis tournant sur lequel le tambour à enrouler le tuyau peut pivoter de 270°, manuellement ou mécaniquement, pour occuper n'importe quelle position. Le tambour enrouleur, d'un diamètre d'environ 2 m, est équipé d'un système d'entraînement à turbine à plein débit et d'une boîte à quatre vitesses, d'un



Figure V.4 - Le bâti à tambour et le tuyau flexible en PE.

d'un dispositif de commande électronique ou mécanique, d'une vanne de sectionnement à surpression, d'un tachymètre et d'un capteur pour le réglage précis de la vitesse de rétraction.

Le mécanisme d'enroulement guide le tuyau en PE avec précision et uniformément durant tout le processus d'enroulement en évitant la formation de coudes et écrasements sur le tuyau enroulé. Un système de vidange permet de vider l'eau laissée dans le tuyau au terme de l'irrigation ; simultanément, la rampe se replie facilement et le chariot dans sa position de transport est hissé hydrauliquement sur le support à tambour.

V.3. Critères et spécifications de conception

V.3.1. Superficie, topographie

La superficie à arroser doit être un champ agricole uni de forme régulière ; elle doit permettre le déplacement du système d'une position à l'autre (figure V.5). La rampe d'arrosage peut fonctionner sur un terrain irrégulier, mais le nivellement préalable du sol est recommandé pour obtenir une pente uniforme maximale



Figure V.5 : Déplacement de la machine.

de 1 %. Une topographie irrégulière peut conduire à de nombreuses difficultés, en particulier si l'eau se met à ruisseler.

V.3.2. Sols

Le sol doit être de texture moyenne avec un taux d'infiltration de plus de 15 mm/h, un bon drainage interne et une capacité de rétention de l'eau suffisante.

V.3.3. Disponibilité en eau

La source d'eau peut être un forage, une rivière ou un petit réservoir de stockage. Le système peut aussi être alimenté par des bornes localisées en divers points sur les bords de la parcelle. La pression de l'eau doit être adéquate pour un fonctionnement normal du système, mais en aucun cas inférieure à 3,5 bars ; dans le cas contraire une pompe de remise en pression est nécessaire en tête du système pour fournir le débit demandé à la pression correcte. La prise du système sera connectée à la prise ou à la sortie de la pompe par un tuyau flexible à raccord rapide.

V.3.4. Qualité de l'eau

L'eau doit être propre et ne pas contenir de solides en suspension ni d'autres impuretés, avoir un pH normal de 6,5 à 8,4 et ne présenter aucun risque de salinité, de présence de sodium ni de problèmes de toxicité causés par les bicarbonates et nitrates ou le bore.

V.3.5. Type de cultures

Les cultures qui seront cultivées sous irrigation par aspersion à enrouleurs à rampes repliables: Exemples

Blé, orge, pois chiche, lentilles, soja, maïs, tournesol, pommes de terre, arachides, luzerne .etc.

V.4. Spécifications particulières et programme d'irrigation

Il convient de souligner que ce système est entièrement différent des systèmes conventionnels d'irrigation par aspersion, car il est axé sur l'intensité de l'application de l'eau d'irrigation. Dans un système conventionnel fixe, la pluviométrie (P) est déterminée par le taux d'infiltration du sol et dépend du débit de l'asperseur (m^3 /heure) et de l'espacement (m) des asperseurs le long de la ligne et entre les lignes. La hauteur (D) d'application de l'eau (dose d'irrigation) est déterminée par le programme d'arrosage et dépend du nombre d'heures de fonctionnement. Par exemple, si $P = 12$ mm/h durant 3,5 heures, $D = 12$ mm/h x 3,5 h = 42 mm.

Dans le système d'aspersion à enrouleurs à rampes repliables, la pluviométrie P est pratiquement identique à la quantité d'eau requise par unité de surface à irriguer. Cette quantité est appliquée en une fois, comme dans les méthodes d'irrigation de surface et non durant une période donnée (durée d'application). En d'autres termes, la surface irriguée simultanément est limitée à la petite superficie arrosée en chaque instant par les mini diffuseurs de la rampe, qui tout au long du trajet apportent la totalité de l'eau nécessaire. Ainsi, l'intensité d'irrigation est très élevée, atteignant 50 à 100 % de la hauteur d'application d'irrigation. Il est évident que ruissellement et formation de flaques sont inévitables dans beaucoup de terrains à taux d'infiltration faible à modéré.

Plus la vitesse de rétraction du chariot mobile est élevée, plus la hauteur d'eau appliquée est faible, et vice-versa. D'autres facteurs importants sont la superficie couverte par tour et le nombre d'heures de fonctionnement du système. Ainsi pour le calcul du programme d'arrosage, les deux formules suivantes peuvent être utilisées, (1) pour la détermination de la vitesse de rétraction et (2) pour la surface irriguée par tour :

$$S = \frac{Q \times 1000}{WD} \quad (1)$$

$$A = \frac{WSH}{10000} \quad (2)$$

Avec: S: vitesse de rétraction en m/h

Q: débit du système en m³/h

W: largeur de la bande irriguée en m

D: hauteur d'eau d'irrigation en mm (dose d'irrigation)

A: superficie par position en ha

H: heures de fonctionnement du système

Pour le programme d'irrigation, les utilisateurs des systèmes d'aspersion à enrouleurs à rampes repliables peuvent utiliser les formules ci-dessus ou utiliser les tableaux préparés à cet effet par les fournisseurs.

Ces tableaux donnent la hauteur d'eau calculée pour diverses vitesses de rétraction de la rampe, en fonction du débit du système et de la largeur de la bande irriguée.

V.5. Coûts

Le coût d'un système complet d'aspersion à enrouleurs à rampes repliables varie en fonction de la dimension de l'unité à irriguer.

V.6. Avantages et inconvénients

V.6.1. Avantages

- Système d'irrigation automatisé, complet en une unité mobile ;
- Efficience d'irrigation de 80 % ;
- Réduction des besoins en main-d'œuvre ;
- Fines précipitations améliorant la structure du sol ;
- Maniement simple ;
- Pas d'installation de tuyaux sur le champ ;
- Idéal pour l'irrigation supplémentaire de grands champs éloignés.

V.6.2. Inconvénients

- Coûts élevés ;
- Fortes intensités de pluviométrie conduisant aux ruissellements ;
- Le système est peu recommandé pour les sols lourds ;
- Déplacement d'un champ à l'autre nécessitant un tracteur.

V.7. Exemple de projet pour une culture de luzerne

V.7.1. Superficie et culture

Le champ est un rectangle de 280 m x 100 m situé le long d'une route, plus ou moins régulier avec pente uniforme, et couvrant une superficie totale de 2,8 ha. Il y pousse de la luzerne pérenne, une culture fourragère à racines profondes tolérante à la salinité.

V.7.2. Sol, eau et climat

Le sol est de texture moyenne, avec un taux d'infiltration > 15 mm/h et une humidité disponible de 120 mm/m. La source d'eau est un forage profond débitant 30 m³/h avec une pression de 3,2 bars à la sortie. L'eau est légèrement saline avec une quantité totale de matière dissoute de 1400 mg/l sans risque de sodium ni d'autre problème. Le climat est semi-aride avec des étés chauds et une évaporation maximale de 9 mm/jour en juillet/août.

V.7.3. Besoins en eau et programme d'irrigation

La luzerne est une culture pérenne qui pousse pendant trois à quatre ans dans les climats à hivers doux. Ses besoins en eau sont élevés, de 900 à 1500 mm par saison. Les variations de consommation d'eau (valeurs de kc) durant la saison d'irrigation dépendent principalement du moment de la coupe et de la période de dormance, pratiquée par les agriculteurs durant les mois chauds. Avec un kc de 0,95 et une efficacité d'application de 80 %, les besoins bruts d'irrigation dans ce cas d'étude s'élèvent à 1350 mm. Chaque saison, la hauteur totale d'eau est appliquée en 27 irrigations, à raison de doses unitaires régulières de 50 mm.

V.7.4. Caractéristiques de la trame du système et performances

La machine à rampe mobile choisie fonctionne avec une pression de 3 bars et un débit de 30 m³/h correspondant à la disponibilité en eau de la source. La longueur de la rampe est d'environ 32 m permettant l'irrigation effective d'une bande de 50 m de largeur. Le tuyau flexible est en plastique PEHD de 75 mm de diamètre et 300 m de long. La rampe repliable est tirée à une extrémité du champ à 280 m du tambour placé à l'autre extrémité près de la borne, le tuyau en PEHD étant déroulé au sol. Lorsque le système fonctionne, le tuyau s'enroule sur le tambour et le chariot avec la rampe est traîné vers l'arrière en arrosant une bande de 50 m de largeur. Avec deux positions de la machine (2 x 50 m x 280 m), toute la parcelle est irriguée. L'application de 50 mm de hauteur d'eau par irrigation est obtenue avec un débit de 30 m³/h et une vitesse de déplacement de 12 m/h (voir tableau ou formules). Le temps requis pour une position est $280 \text{ m} \div 12 \text{ m/h} = 23,3$ heures. Avec 8 heures de fonctionnement par jour, trois jours sont nécessaires par position, soit 6 jours pour l'irrigation de toute l'unité. En été la durée quotidienne peut atteindre 10 ou 12 heures, ce qui peut réduire l'irrigation de toute l'unité à quatre jours. En accord avec le programme d'irrigation, les 27 irrigations se répartissent ainsi: 2 en avril, 3 en mai, 5 en juin, 5 en juillet, 5 en août, 4 en septembre et 3 en octobre. Durant la période de pointe la machine fonctionnera 20 jours par mois pour répondre aux besoins.

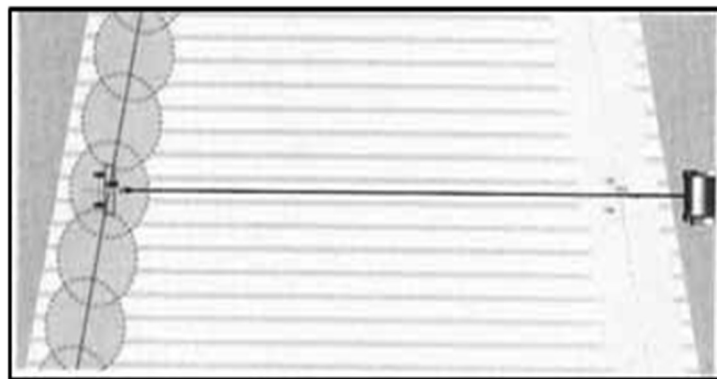


Figure V.6 : Positions d'une machine à enrouleurs à rampes repliables.

Chapitre VI : Systèmes d'irrigation par aspersion à pivot central

VI.1. Introduction

Le système d'irrigation par aspersion à pivot central est constitué d'une seule conduite d'arrosage de diamètre relativement grand, composée de tuyaux en acier léger galvanisé ou aluminium à haute résistance, suspendus au-dessus du sol par de longues structures métalliques et/ou des câbles et posés sur des tours mobiles sur roues. Une extrémité de la conduite est raccordée à un mécanisme à pivot implanté au centre de la zone à irriguer : l'ensemble de la conduite tourne autour du pivot. Le pivot central est un système d'irrigation automatisé, entièrement mécanisé à basse/moyenne pression et assemblé de manière permanente. Le coût de chaque unité étant relativement élevé, ce système est mieux adapté aux grandes exploitations irriguées. La superficie irriguée peut varier entre 3,5 et 60 ha, selon la taille du pivot central, et plus la superficie arrosée est vaste, plus le coût unitaire par ha est faible.



Figure VI.1 : Irrigation à pivot central

VI.2. Trame du système et composantes

VI.2.1. La conduite d'arrosage

La longue conduite latérale portant les distributeurs d'eau (asperseurs, barboteurs ou mini-diffuseurs) a un diamètre qui peut varier entre 140 et 250 mm, selon le débit et la longueur du système. La longueur de la conduite peut varier de 50 à 750 mètres, selon le projet. Elle est constituée d'aluminium ou d'acier léger galvanisé à résistance élevée, avec des raccords extra forts pour résister aux pressions de fonctionnement du système.



Figure VI.2 : Vue générale d'un pivot central

La conduite est disposée entre les tours intermédiaires de support en forme de A et sur roues, dont la hauteur type au-dessus du sol est de 03 mètres minimums et qui sont espacées de 35 à 55 m ; la longueur habituelle ou standard est de 40 mètres.

VI.2.2. Les distributeurs d'eau

Les distributeurs d'eau, dont le diamètre et l'espacement sont déterminés par ordinateur pour une application uniforme de l'eau, sont montés sur la conduite à des intervalles de 1,5 m, 3 m ou 6 m approximativement selon le type et la couverture des distributeurs ; ils ne fonctionnent que lorsque la machine est en mouvement. Dans le temps, les distributeurs étaient des asperseurs rotatifs en cercle complet.



Figure VI.3 : Tubes suspendus avec mini-diffuseurs

Le débit des distributeurs le long de la conduite n'est pas le même d'un bout à l'autre, mais varie des valeurs plus faibles près du centre aux plus élevées vers l'extrémité par l'utilisation respective de buses de petits et grands diamètres, et quelquefois par la variation des espacements.

Les pressions de fonctionnement étant faibles le long de la ligne, le système est sensible aux variations de pression causées par les pertes de charge dues au frottement ou les différences d'élévation ou inégalités du sol. L'installation de manomètres permettant un suivi fréquent est importante, afin d'assurer un débit uniforme et une bonne efficacité et uniformité d'application. La pression d'admission normale dans le système à pivot est légèrement inférieure à 3 bars.

VI.2.3. La tour centrale

Il s'agit d'une structure pyramidale d'environ 3,5 à 4,5 m de hauteur, ancrée dans un socle en béton formant une plateforme carrée. Elle constitue la tête du système et comporte tout l'équipement nécessaire pour la commande du système, tel que le dispositif en tube vertical avec coude au sommet, alimenté en eau et équipé d'entrées pour l'injection d'engrais liquide, l'anneau collecteur, et le panneau central de commande.



Figure VI.4 : La tour centrale

VI.2.4. Le système de commande du pivot central

Un panneau de commande, protégé par un coffret, est installé sur la tour centrale du pivot ; il permet le maniement de la machine d'arrosage et la programmation de l'irrigation, c'est-à-dire la commande du débit, la période de rotation et de fonctionnement de la conduite tournante et la vitesse/durée de chaque tour. Un

voltmètre et plusieurs lampes témoins indiquent la tension, l'alarme des tours de support et le manque de pression. Un démarreur automatique, un dispositif d'arrêt sur position, un arrêt automatique et un compteur horaire sont aussi inclus dans les panneaux standards. Les fabricants offrent plusieurs modèles avec divers niveaux de contrôle, dont une commande à distance par téléphone cellulaire.

VI.2.5. Le fonctionnement de la machine

La machine à pivot central, entièrement mécanique, fonctionne automatiquement.

De petits moteurs électriques, montés sur chaque tour à deux roues, assurent le déplacement de la machine. En l'absence de branchement électrique, un générateur est adjoint au système.

La distance parcourue par chaque tour de support varie d'un maximum à l'extrémité de la conduite latérale à un minimum près de la tour centrale. Les tours ne bougent pas continuellement, mais progressent par une série d'avances et d'arrêts contrôlée par la fréquence de mouvements de la tour guide externe.



Figure VI.5 : Les tours de support

VI.2.6. Le générateur

Dans la plupart des cas et spécialement dans les régions dépourvues d'installations électriques, un petit générateur relié à la tour centrale, doté d'un moteur diesel avec un réservoir de carburant, produit l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du système.

VI.3. Avantages

- Efficacité d'application élevée de 75–85% permettant des économies d'eau, avec contrôle absolu de l'eau d'irrigation depuis la source jusqu'à la plante.
- Meilleure uniformité d'application en comparaison d'autres systèmes d'aspersion ou de vaporisation, en raison de la continuité de distribution de l'eau.
- En fin d'irrigation, le système se retrouve au point de départ.
- Economies de main-d'œuvre et de carburant.

- Contrôle de la salinité. Le lessivage intégral de la zone racinaire en fin de saison est très efficace avec le pivot central.
- Applicable en irrigation supplémentaire des céréales cultivées en sec durant les périodes de sécheresse.

VI.4. Inconvénients

- Investissement initial important.
- Non adapté aux petites exploitations.

VI.5. Critères et spécifications de conception

VI.5.1 Conception et installation

Les fabricants et fournisseurs sont responsables de la conception des structures mécaniques et des mécanismes de déplacement des systèmes à pivot central. Ils sont aussi responsables du montage de la machine (Figure VI.6). Les fabricants fournissent aussi le manuel technique qui indique les différents stades de préparation de la machine en début de saison, l'entretien nécessaire durant l'utilisation et les stades de préparation de la mise hors service quand le matériel ne sera pas utilisé pendant longtemps.



Figure VI.6: Le montage du pivot central

Les machines à pivot central neuves n'ont que rarement besoin de pièces de rechange, mais un stock de pièces sera nécessaire pour plusieurs années après l'installation. Il y a des dispositions particulières à prendre pour le transport (Figure VI.7), le stockage, le chargement et le déchargement de la machine, ainsi que pour son installation.



Figure VI.7 : Déplacement du système

VI.5.2. Taux d'application et fréquence d'irrigation

Tous les systèmes et méthodes d'irrigation sont prévus pour appliquer l'eau à des taux égaux ou inférieurs à celui de l'infiltration du sol. Le système à pivot central est essentiellement conçu sans tenir compte du taux d'absorption du sol. La conception du système à pivot central est basée sur l'application par irrigation d'un volume d'eau n'excédant pas le volume de stockage du sol. Le diamètre mouillé par les mini-diffuseurs dépasse

largement celui des barboteurs, mais le ruissellement de surface qui se produit réduit l'efficacité et l'uniformité d'application en raison de la redistribution de l'eau sur le sol. La vitesse de déplacement est un facteur important dans la conception de ces systèmes.

Des programmes d'irrigation détaillés doivent être préparés sur place. Dans tous les cas, en région semi-aride, le système d'irrigation à pivot central doit être conçu pour les besoins en eau de pointe des cultures, jusqu'à 8–9 mm/jour et des heures quotidiennes de fonctionnement accrues doivent être prévues durant cette période.

VI.5.3. Spécifications particulières

Les types et catégories de sols, leur topographie, capacité de rétention et taux d'infiltration, sont parmi les principaux facteurs conditionnant le succès de l'application du système à pivot central. L'un des principaux problèmes est que ce type de machine fournit un taux pluviométrique très élevé, car les petits distributeurs (mini-diffuseurs et barboteurs) ont un très faible diamètre de couverture (quantité d'eau supérieure sur une aire plus petite). Cela entraîne généralement un dépassement de l'absorption du sol, qui conduit à la formation de ruissellement et de flaques d'eau. Dans ce cas, l'application de pratiques additionnelles de prévention du ruissellement est nécessaire.

En cas d'application plus importante que le taux d'infiltration, un ruissellement significatif se produira sur les pentes supérieures à 3 %. Ce problème peut être résolu par la modification de la surface du sol, ou l'utilisation de mini-diffuseurs dotés de plus grands diamètres de couverture, favorisant l'application de l'eau sur une superficie accrue.

Si le sol devient trop humide et par conséquent collant, la machine peut également s'enliser. La vitesse de déplacement de la machine est un facteur essentiel, car elle affecte la pluviosité, qui ne doit pas être égale à la dose d'irrigation (application d'eau). Il faut alors appliquer la dose d'irrigation en plusieurs fois.

VI.5.4. Critères de sélection du site

* **Superficie, dimensions, forme et Topographie** : Les systèmes à pivot central peuvent fonctionner sur un sol inégal ; toutefois, des terrains relativement horizontaux ou à pente uniforme inférieure à 3 % sont recommandés. Une topographie ondulée peut occasionner de nombreuses difficultés, particulièrement en cas de ruissellement.

* **Type de sol** : Le sol doit être de texture légère à moyenne avec un taux d'infiltration élevé (> 15 mm/h) et un bon drainage interne.

* **Disponibilité en eau et pression** : La source d'eau peut être un forage, une rivière ou un petit réservoir d'eau. Mais les systèmes circulaires à pivot central doivent être alimentés par une borne située à proximité du pivot. Une pompe de remise en pression peut éventuellement fournir l'eau à la pression requise. La prise d'entrée du système est connectée à la borne par un tuyau flexible à connexion rapide.

* **Qualité de l'eau** : L'eau doit être propre et ne pas contenir de solides en suspension ni d'autres impuretés, avoir un pH normal, et ne présenter aucun risque de salinité, de présence de sodium ni de problèmes de toxicité causés par les bicarbonates et nitrates ou le bore.

* **Besoins en carburant** : Les systèmes à pivot central sont équipés de générateurs à moteur diesel pour le déplacement des tours et des pompes de remise en pression. Le réservoir de carburant doit être relié à d'autres réservoirs de plus grande taille pour un fonctionnement continu durant de longues périodes.

* **Type de cultures** : Cultures hivernales (blé, orge, pois chiche, lentille); cultures industrielles (soja, maïs, tournesol) ; autres cultures (légumes à feuilles, arachides, melons, pastèques, luzerne, etc.)

VI.6. Exemple de projet

La conception d'un projet d'irrigation par pivot central est relativement plus simple que celle de systèmes conventionnels par goutte-à-goutte.

Une culture de plein champ d'été est sélectionnée dans une région semi-aride avec une forte évapotranspiration et des ressources en eau plutôt limitées. Les principales étapes sont les suivantes :

- détermination de la surface irriguée, de la longueur du rayon de la machine à pivot central et des principales caractéristiques de la culture (profondeur d'enracinement, saison de croissance, stades critiques, etc.);
- calcul des besoins en eau de pointe des cultures et de l'humidité disponible du sol (capacité de rétention en eau);
- programme d'irrigation (dosage, nombre d'heures quotidiennes de fonctionnement et intervalle entre les irrigations);
- principales caractéristiques du système et spécifications techniques.

VI.6.1. Superficie, rayon d'action de la machine et cultures

La superficie à irriguer couvre environ 15 ha avec des pentes faibles. La conduite du système à pivot central est longue de 215 m de distance effectivement arrosée et atteint 218,50 m avec le canon asperseur d'extrémité. La périphérie de l'aire circulaire mesure environ 1372 m (circonférence = $2 \pi r$) (Figure VI.9). La superficie est plantée d'arachides (*Arachis hypogaea*), une culture sensible pour laquelle toute pénurie d'eau se traduit par une perte sensible de rendement ; saison de croissance : avril à septembre, 130 jours environ ; profondeur d'enracinement effectif : 0,65 m; valeurs de kc: stade initial, 0,45

– croissance végétative, 0,75 – floraison et formation de la graine, 1 et 0,75 au dernier stade. Le stade de mi-saison, d'environ 45 jours avec un kc de 1, tombe en juillet/août avec une demande d'eau d'irrigation maximale.

VI.6.2. Besoins en eau et sols

L'ETo maximale en juillet/août est de 7 mm/jour, multipliée par le kc = 1 de la culture: $ETc = 7$ mm/jour. Avec une efficacité du système d'irrigation de 85 %, les besoins bruts sont de $7 \text{ mm} \div 0,85 = 8,2$ mm/jour ou $8,2 \text{ mm} \times 10 \times 15 \text{ ha} = 1230 \text{ m}^3/\text{jour}$ en période de pointe. Le sol est de texture légère à moyenne avec une humidité disponible de 120 mm/m de profondeur de sol et un taux d'infiltration $> 15 \text{ mm/h}$. À partir des données ci-dessus, un programme détaillé d'irrigation peut être préparé.

VI.6.3. Caractéristiques des systèmes

Les performances des systèmes doivent répondre aux demandes en période de pointe, à celles des autres périodes de croissance, ainsi qu'aux conditions existantes en ce qui concerne la disponibilité en eau, les heures quotidiennes de fonctionnement, le coût du carburant, etc. Les facteurs et données requises pour le calcul du débit du système sont : la dose d'irrigation et le besoin quotidien en eau.

- Le dosage (d) = humidité disponible du sol en mm/m x pourcentage de tarissement de l'humidité (p) x profondeur d'enracinement en m (D).

- La fréquence d'irrigation en jours est égale à $d \text{ (mm)} \div ETc/\text{jour}$.

- L'intervalle entre les irrigations (fin de l'une jusqu'au début de la suivante) est la fréquence en jours, moins la période requise pour mener à bien une irrigation.

Cette dernière dépend de l'importance du débit et du nombre d'heures quotidiennes de fonctionnement. Dans la plupart des cas, le débit disponible dicte les caractéristiques et performances de base du système.

Un débit du système autour de 15–17 l/s (60 m³/h) est choisi et les heures quotidiennes de fonctionnement pour couvrir la demande de la culture au stade de mi- saison sont : $1230 \text{ m}^3/\text{jour} \div 60 \text{ m}^3/\text{h} = 20.5 \text{ h/jour}$.

Pour un tour par jour la vitesse est de 1,115 m/mn. Pour deux tours par jour cette vitesse est de 2,23 m/min et le temps par tour de 10 heures 30 minutes.

VI.6.4 Spécifications minimales pour le système à pivot central

Caractéristiques générales du système à pivot central

• Composantes du système :

- a) tour centrale du pivot avec panneau de commande et générateur, déplaçable sur roues pivotantes ;
- b) conduite avec mini-diffuseurs sur tubes suspendus et canon d'aspersion en bout de ligne, soutenue par 4 tours automotrices intermédiaires sur roues ;
- c) pompe de remise en pression avec moteur ;
- d) longueur des travées : 40 à 50 m. Hauteur minimale laissée aux cultures : 3 m.

• **Longueur de la conduite** 215 m (4 travées d'environ 50m + 15m de travées en porte-à-faux) (Figure VI.8).

• **Rayon d'arrosage** : environ 218.5 m.

• **Débit du système** : 60 m³/h.

• **Pression à l'entrée du pivot** : environ 2.3 bars.

• **Superficie couverte** : environ 15 ha.

• **Vitesse minimale par tour** : 0.3 m/mn ; temps par tour : 76 h ; pluviométrie : 30.4 mm.

• **Vitesse maximale par tour** : 3 m/mn ; temps par tour : 7.6 h ; pluviométrie : 3.04 mm.

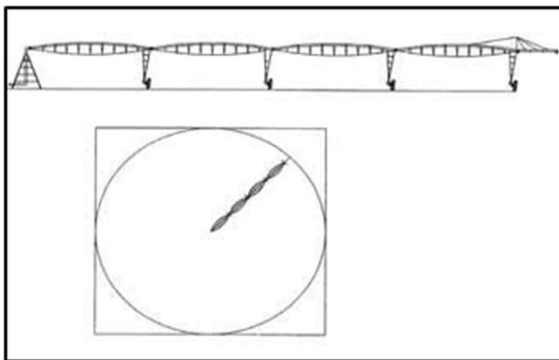


Figure VI.8 : Le Trame du système



Figure VI.9 : Porte-à-faux Escamotable

Chapitre VII : Les micro-asperseurs

VII.1. Introduction

Les micro-asperseurs sont des distributeurs d'eau à capacité réduite, de type asperseur, mais plus petits en dimension que les asperseurs conventionnels et dont les débits sont inférieurs à 250 litres/heure. Ils sont disposés sur un espace triangulaire ou rectangulaire relativement compact permettant un recouvrement maximal, pour irriguer les cultures de plein champ à forte densité de plantation. Cette méthode d'irrigation est fiable, très efficace et facile à appliquer, opérer et manipuler.

C'est une installation de micro-irrigation fixe, saisonnière, à basse pression qui se monte facilement dans les champs et se démonte rapidement (s'enlève) en fin de saison.

VII.2. Trame et composantes du système

La trame du système comprend un ouvrage de tête équipé seulement de vannes de contrôle (sectionnement, anti-retour, purge d'air) et d'un filtre d'environ 200–300 microns. Aucun injecteur d'engrais n'est requis car en général les agriculteurs n'utilisent pas ce système pour l'irrigation fertilisante.

La disposition des conduites principale et secondaires, bornes et adducteurs est semblable à celle des autres réseaux de conduites pour la micro-irrigation.

La dimension des lignes d'adducteurs sera de 50 à 63 mm et en aucun cas ne dépassera 75 mm. Des tuyaux de 50 à 63 mm ont recommandé pour des débits de 12 à 18 m³/h, lorsque l'eau est distribuée continuellement en cours de déplacement.

Les tuyaux utilisés pour les réseaux de distribution du système sont généralement en PVC rigide enterré ou en PEHD noir (normalement posés en surface). D'autres types de tuyaux sont aussi utilisés, tels que des tuyaux plats ou des tuyaux à raccord rapide en acier léger galvanisé.

Les conduites latérales sont des conduites en PE ductile de diamètres de 20, 25 ou 32 mm, selon la longueur, et de pression admissible de 4 bars, qui sont posés en surface de manière permanente. Les micro-asperseurs sont placés le long de la conduite latérale à des intervalles de 5 à 7 m et disposés à 70–80 cm au-dessus du sol sur des tiges en métal plantées dans le sol. Ils sont connectés aux conduites latérales par de petits tubes flexibles en PVC de 7 à 9 mm de diamètre et d'un mètre de long.

VII.3 Les micro-asperseurs de distribution

Ces distributeurs sont des asperseurs rotatifs à bas débit conçus pour distribuer uniformément de faibles quantités d'eau sur toute la superficie à irriguer sous forme de pluie (Figure VII.1). Fabriqués en plastique durable, ils présentent divers dispositifs de fonctionnement. Ils ont une trajectoire basse (angle du jet au-dessus de la buse) à rotation rapide avec des buses de 1,5–2 mm.

Leurs principales caractéristiques sont :

- pression de fonctionnement : 2 bars;
- débit: 130–250 l/h (on recommande 160–180 l/h);
- diamètre du cercle arrosé (couverture): en moyenne 12 m;
- taux de pluviométrie: 4 à 7 mm/h (recommandé);
- filtration requise: environ 300 à 250 microns.

Un jeu complet comprend : a) la tête compacte d'aspersion, b) une tige métallique de 6 mm et d'un mètre de long et c) un tube flexible en PVC de 7 à 9 mm avec un embout cannelé permettant la connexion avec la conduite latérale.

VII.4. Programmation de l'irrigation

Ce système permet un grand degré de maîtrise, tant de la période optimale d'application que de la quantité d'eau à appliquer. Les restrictions imposées par le système sont limitées. Ainsi, il y a beaucoup plus d'options de temps dans la programmation de l'irrigation. Les légumes ainsi irrigués sont principalement des cultures à faible enracinement, d'où le choix d'une option d'irrigation à dosage fixe.

Une hauteur brute d'application de 20 à 30 mm est courante pour les pommes de terre et les légumes. Les besoins en eau bruts d'une plantation de légumes ou de pommes de terre varient de 300 à 400 mm en termes de hauteur d'eau. Ainsi le nombre total d'irrigations requises est d'environ 12 à 15, à des intervalles basés sur l'évaporation cumulée.



Fig VII.1 : Micro-asperseurs de distribution

VII.5. Critères et considérations de conception

Outre les critères standards de conception, telle la superficie, la culture, l'alimentation en eau, le sol et le climat, il est très important de considérer les traits et caractéristiques spéciaux du système, car ces paramètres influencent la décision finale.

Les micro-asperseurs distribuent l'eau à de faibles taux d'application, sous la forme de fines gouttes. Celles-ci sont facilement entraînées dans l'air même en cas de vitesses du vent basses et modérées. Afin d'assurer une uniformité élevée d'application, l'espacement des asperseurs doit être réduit et ne pas excéder 50 % du diamètre du cercle arrosé, c'est-à-dire que l'espacement des asperseurs le long des conduites latérales et entre celles-ci doit être compris entre 5 et 7 m. Par conséquent les espacements habituels sont 5 x 5 m, 5 x 6 m, 5 x 7 m, et 6 x 7 m. De plus, pour atténuer les effets nocifs du vent, un nombre relativement élevé d'asperseurs par unité de surface doit fonctionner simultanément. Les tours doivent être organisés de façon à ce que la surface irriguée en même temps soit aussi compacte que possible.

Les conduites latérales du système sont constituées de tuyaux en PEFD.

L'expérience indique que le diamètre optimum de ces derniers est de 32 mm, car de tels tuyaux sont faciles à placer, à manipuler sur le terrain et à enlever, etc. De plus grands diamètres ne sont pas recommandés.

La longueur maximale admissible des conduites latérales de diamètres variés, posées en terrain uniforme, est fonction du nombre d'asperseurs, de leur espacement et du débit distribué, selon les données du tableau suivant (Tableau VII.1):

Diamètre latéral (D)	et espacement (E)	160 l/h		180 l/h	
		Nb. asperseurs	Longueur de la conduite latérale (m)	Nb. asperseurs	Longueur de la conduite latérale (m)
20 mm	5 m	8	40	7	35
20 mm	6 m	7	42	6	36
20 mm	7 m	7	49	6	42
20 mm	8 m	7	56	6	48
25 mm	5 m	12	60	11	55
25 mm	6 m	11	66	10	60
25 mm	7 m	10	70	10	70
25 mm	8 m	10	80	9	72
32 mm	5 m	21	105	18	90
32 mm	6 m	20	120	17	102
32 mm	7 m	18	126	16	102
32 mm	8 m	18	144	15	120

VII.6. Coûts

L'ouvrage de tête représente 8 à 10 % du coût total du système ; les tuyaux (tubes) en plastique, 50 %, et les asperseurs à faible débit environ 35 %.

VII.7. Avantages

- Faibles besoins en main-d'œuvre pour le fonctionnement et l'entretien.
- Flexibilité et adaptabilité : la technique est simple et facile à adopter et à gérer.
- Efficience d'application de l'irrigation élevée.

VII.8. Inconvénients

- Coût initial élevé.

VII.9. Exemple de projet : Micro-asperseurs pour un champ de pommes de terre

Superficie et cultures

Il s'agit d'une parcelle de 120 x 85 m (1 ha), plantée de pommes de terre de printemps.

Sol, eau et climat

Sol de texture fine à structure favorable avec une perméabilité d'environ 11 mm/h et une capacité de rétention d'eau élevée (200 mm/m). L'eau, claire mais légèrement salée, est fournie par un réservoir. La saison culturale de la pomme de terre de printemps s'étend de janvier à mai. En avril, l'évaporation en bac est en moyenne de 3,3 mm/jour ; multipliée par le facteur de correction de l'évaporation en bac (0,66), la valeur de l'ET_o est de 2,18 mm/jour.

Besoins en eau et programme d'irrigation

La demande de pointe se situe en avril et la valeur k_c est de 0,9. Par conséquent $ET_c = 2,18 \times 0,9 = 1,96$ mm/jour (besoin en eau net de pointe).

L'efficience d'application du système est de 75 %. Il faut aussi compter 15 % de plus pour le lessivage des sels. Les besoins bruts d'irrigation en période de pointe sont :

$$1,96 \text{ mm/jour} \times 100 \div 75 = 2,61 \text{ mm/jour} \times 100/85 = 3,1 \text{ mm/jour} \times 10 \times 1 \text{ ha} = 31 \text{ m}^3/\text{jour}$$

L'humidité disponible du sol est de 200 mm/m de profondeur, la profondeur effective d'enracinement est de 0,35 m et le tarissement maximal de l'humidité recommandé est de 40 %. L'intervalle maximal d'irrigation en avril est de : $200 \times 0,35 \times 0,4 \div 1,96 = 14$ jours

Le programme d'irrigation est basé sur un tarissement fixe d'environ 20 mm (évaporation cumulée). Ainsi l'intervalle en avril est de 10 jours ($20 \div 1,96$). La dose brute d'irrigation est de 31,4 mm, ce qui donne une quantité brute par irrigation de 314 m³/ha.

Trame du système

Le système est une installation fixe où toutes les conduites latérales avec asperseurs sont disposées sur le sol de manière permanente. L'ouvrage de tête est muni de vannes de régulation et d'un filtre à tamis de 250 microns. Il n'y a qu'une conduite principale en PEHD de 75 mm, de PN 6 bars, posée sur le côté de la parcelle et qui sert d'adducteur alimentant les conduites latérales. Les conduites latérales avec asperseurs sont en PEFD de 32 mm, 4 bars, connectées avec la conduite principale par des bornes de 2½ in.

Asperseurs

160 l/h à 2 bars, cercle d'arrosage complet, diamètre d'arrosage (couverture) 11 m. Espacement : 5 m le long de la conduite latérale par 5 m entre les conduites latérales. Pluviométrie : 6,4 mm/h. Nombre d'asperseurs par conduite latérale : 17.

Débit des conduites latérales

2720 litres/heure ; Nombre total de conduites latérales : 24 ; nombre de conduites latérales fonctionnant simultanément (par tour) : 6 ; débit du système : 16,3 m³/h ; nombre de tours par irrigation : 4 ; durée d'application par tour : 4,9 h (4h 50 min) ; temps requis pour une irrigation 19,5 h (ensemble des tours) (Tableaux VII.2 et VII.3 et figures VII.2 et VII.3).

Tableaux VII.2 : Pressions de fonctionnement du système

Pression de fonctionnement du système	Pression (bars)
Pression requise à l'asperseur	2,00
Pertes de charge dues au frottement dans la conduite latérale:	0,20
Pertes de charge dues au frottement dans la conduite principale:	0,35
Pertes de charge dues au frottement dans l'ouvrage de tête:	0,50
Pertes mineures:	0,20
Charge totale dynamique:	3,25

Tableau VII.3 : Liste des équipements nécessaires pour l'installation

Pièce n°	Description	Quantité
Réseau de distribution		
1.	Conduite noire PEHD 75mm, 6 bars	120 m
2.	Tuyau noir PEFD 32 mm 4 bars	2040 m
3.	Adaptateur PP 2 ½ in x 75mm	1 U
4.	Adaptateur PP 1 in x 32 mm	24 U
5.	Bouchon PP 75mm	1 U
6.	Bouchon PP 32mm	24 U
7.	Collier de prise en charge PP 75mm x 1 in	24 U
8.	Vanne sect. laiton 1 in	24 U
9.	Raccord 1 in	24 U
10.	Asperseur à basse capacité, 160 l/h à 2 bars, cercle complet de 11 m de diamètre, avec support et tube de connexion	408 U
Sous-total		
Ouvrage de tête		
11.	Vanne de contrôle laiton 2 ½ in	1 U
12.	Vanne de sectionnement laiton 2 ½ in	2 U
13.	Té 2 ½ in (métal galvanisé ou PVC)	3 U
14.	Raccord 2 ½ in	4 U
15.	Purgeur d'air 1 in	1 U
16.	Filtre à tamis 60 mesh	1 U
Sous-total		
COÛT TOTAL:		

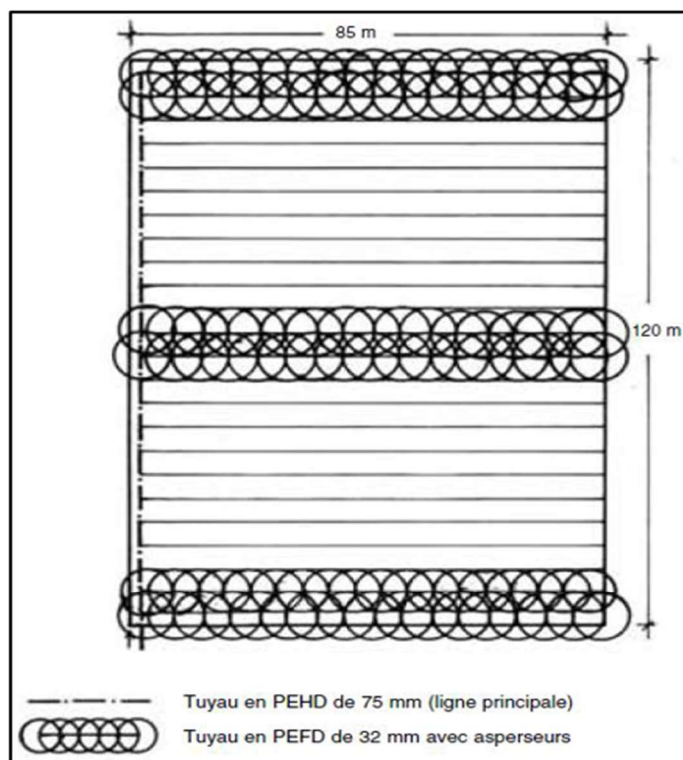


Figure VII.2 : Exemple de trame - Irrigation par aspersion
à basse capacité des pommes de terre (système fixe)

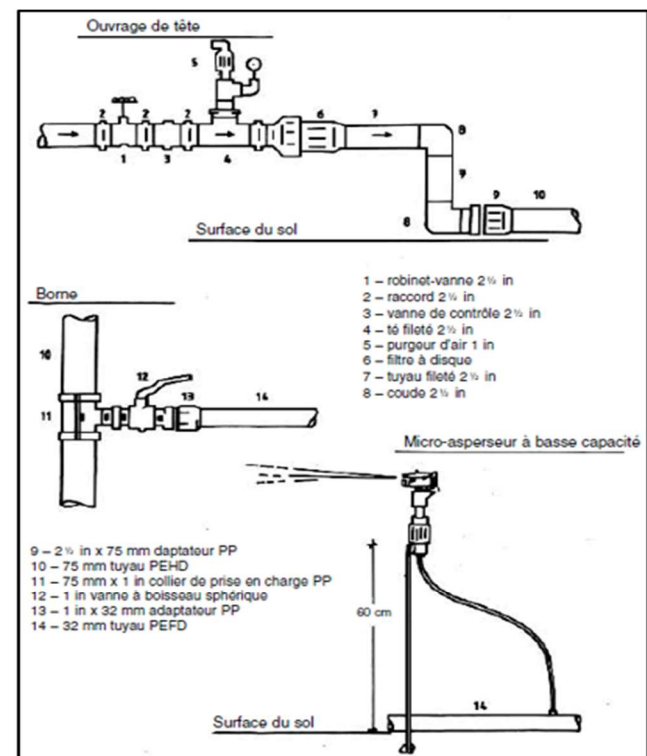


Figure VII.3 : Système de micro-irrigation à basse capacité

Chapitre VIII : Les mini-asperseurs

VIII.1. Introduction

Cette méthode consiste à placer un seul distributeur de type mini-asperseur au pied de chaque arbre. Le distributeur asperge d'eau une superficie circulaire limitée, sous le feuillage autour du tronc, avec des débits très faibles. Cette approche combine les principes et avantages des deux systèmes d'irrigation, par aspersion et par goutte-à-goutte localisé.

L'irrigation par mini-asperseur est une micro-irrigation localisée, utilisant un système à basse pression sur une installation fixe permanente ou saisonnière.

VIII.2. Trame et composantes du système

L'ouvrage de tête peut être aussi simple que possible. Toutefois un dispositif de filtrage est requis comme dans toutes les installations de micro-irrigation. Un injecteur d'engrais n'est pas toujours nécessaire, car de nombreux fermiers préfèrent appliquer l'engrais manuellement. Néanmoins, la disposition de l'équipement devra toujours permettre l'installation ultérieure d'un injecteur d'engrais.

Les conduites principales et secondaires seront assemblées de manière permanente, soit en surface, soit enterrées, avec des bornes (2–3 pouces) implantées soit en surface, soit dans une boîte de soupapes pour les configurations enterrées.

Les adducteurs peuvent être en PEHD s'ils sont posés en surface, ou en tuyau rigide PVC quand ils sont enterrés. D'autres types de tuyaux peuvent aussi être utilisés, tels les tuyaux plats ou les tuyaux à raccord rapide en acier léger.

Les conduites latérales avec les mini-asperseurs sont posées le long des rangs d'arbres près des troncs, une ligne pour chaque rangée, avec un mini-asperseur au pied de chaque arbre.

Les raccords des conduites latérales sont généralement des tuyaux en PEFD souples de 16, 20, 25, et 32 mm de diamètre, avec une pression de service PN de 4 bars. Des tuyaux enterrés de petit diamètre en PVC peuvent aussi être utilisés comme conduites latérales, avec de plus longs petits tubes de raccordement sortant à la surface.

VIII.3. Les mini-asperseurs de distribution

Les micro-pulvérisateurs utilisés dans les vergers (figure VIII.1), nommés mini-asperseurs, ou micro-jets, sont de petits distributeurs en plastique, qui distribuent un petit débit à faible angle sous la forme de fines gouttes, réparties uniformément autour des arbres, selon une couverture circulaire totale ou partielle.



Figure VIII.1. Irrigation d'un verger par mini-asperseurs.

Ils peuvent comporter différents mécanismes, avec une vaste gamme de débits et diamètres de couverture. Tous ont une section d'écoulement au travers de la buse plutôt faible (diamètre de buse de 1 à 1,7 mm environ). Les eaux distribuées devront être filtrées avant d'entrer dans le système.

Les principales caractéristiques de fonctionnement des mini-asperseurs sont:

- pression de fonctionnement : 1,5 à 2 bars;
- débit : 35 à 250 l/h (en général 150 l/h);
- diamètre arrosé : 3 à 6 m;
- pluviométrie : 2–20 mm/h (en général 4 à 8 mm/h);
- filtration requise : 200–250 microns.

Les têtes des mini-asperseurs sont fixées à des tiges de plastique ou à de petites barres métalliques à 20 ou 30 cm au-dessus du sol; elles sont connectées aux conduites latérales en PE par des tubes souples en plastique de 7 à 9 mm et longs de 60 à 120 cm. Ainsi, un distributeur complet de mini-aspersion comprend la tête, la tige de support et le tube de connexion avec l'embout. Tous les composants s'emboîtent à pression, sont interchangeables et peuvent facilement être montés ou démontés.

VIII.4. Programmation de l'irrigation

Comme dans toutes les méthodes localisées de micro-irrigation, la quantité d'eau stockée dans la zone racinaire est limitée en raison du faible volume de sol humidifié. Toutefois, avec cette méthode, le volume humide de sol dépasse 65 % du volume total ; par conséquent, il n'existe aucune urgence à pratiquer des irrigations fréquentes, à moins que la capacité de rétention de l'humidité du sol ne soit très basse.

La pratique courante est d'irriguer à intervalles fixes sur une base hebdomadaire et d'appliquer les besoins en eau cumulés des jours précédents. Avec de jeunes arbres, l'intervalle d'irrigation sera plus court, soit deux fois par semaine. La majorité des exploitants des zones arides et semi-arides distribuent l'eau à leurs arbres fruitiers conformément aux indications du tableau ci-dessous (Tableau VIII.1).

TABLEAU VIII.1. Programme d'irrigation par mini-asperseurs

Age des arbres (années)	Débit unitaire (litres/jour/arbre)	Intervalle d'irrigation (jours)	Dose moyenne (litres par arbre)	Durée moyenne d'opération (heures)
1-2	8-15	4-6	60	0,5
3-4	20-40	6-7	200	1,6
4-6	50-60	7	380	3,0
Plus de 7	80-120	7-10	900	7,5

VIII.5. Critères et considérations de conception

Les mini-asperseurs sont essentiellement utilisés pour l'irrigation intensive d'arbres fruitiers. Ils sont aussi employés pour l'irrigation supplémentaire d'arbres cultivés en sec. Un mini-asperseur par arbre est suffisant ; par conséquent l'écartement des distributeurs correspond à celui des arbres. La distance entre l'asperseur et le tronc de l'arbre est de 30 à 50 cm, selon l'âge et la dimension de l'arbre. Pour les jeunes arbres, les têtes d'asperseurs peuvent être montées à l'envers afin de réduire le diamètre arrosé.

Le taux de distribution du distributeur doit être adapté aux conditions existantes de disponibilité en eau, à la superficie, au nombre, à l'âge et aux dimensions des arbres, et au nombre de tours d'irrigation (programme d'irrigation). Ceci n'est pas une tâche compliquée, si l'on considère la vaste gamme des débits de mini-asperseurs disponibles.

TABLE VIII.2. Nombre maximal de mini-asperseurs sur la conduite latérale et longueur de la conduite latérale sur sol uni. Débit des mini-asperseurs à 2 bars

Débits:		70 l/h		120 l/h		150 l/h	
Conduite latérale Diamètre et espacement (m)		Nombre asp.	Long latéral (metres)	Nombre asp.	Long latéral (metres)	Nombre asp.	Long latéral (metres)
16 mm	3	10	30	7	21	6	18
	4	9	36	6	24	6	24
	5	8	40	6	30	5	25
	6	8	42	5	30	5	30
	8	7	56	5	40	4	32
20 mm	3	16	48	11	33	9	27
	4	15	60	10	40	9	36
	5	14	70	9	45	8	40
	6	13	78	9	54	8	48
	8	11	88	8	64	7	56
25 mm	3	25	75	18	54	15	45
	4	22	88	16	64	14	56
	5	20	100	15	75	13	65
	6	19	114	14	84	12	72
	7	18	144	12	96	11	88

VIII.6. Coûts

- Le coût pour l'ouvrage de tête : 26 % du coût total.
- La partie la plus importante du coût est absorbée par le réseau de conduites en PE, soit 55 % du coût total pour un système de 1 ha. Pour une installation complète de 3 ha, les conduites représentent environ 65 % du coût total.

VIII.7. Avantages

- Efficience d'irrigation élevée. La quantité d'eau est contrôlée avec précision, et seule une surface partielle est arrosée ; aucunes pertes dues à l'évaporation, à la percolation profonde ou au ruissellement.
- Contrôle de la salinité. L'écoulement de l'eau au travers du sol se fait verticalement et les sels accumulés dans la zone racinaire peuvent être facilement lessivés dans des couches plus profondes.
- Souplesse et adaptabilité. C'est le plus flexible des systèmes de micro-irrigation, facilement adopté et géré par les exploitants. La technologie est simple et la gamme d'équipements relativement modeste.
- Besoins réduits en main-d'œuvre.

VIII.8. Inconvénients

- Investissements initiaux élevés.

VIII.9. Exemple de projet – Irrigation de citronniers par mini-asperseurs

Superficie et cultures

La parcelle, qui mesure 85 x 120 m, c'est-à-dire environ 1 ha, est plantée de citronniers en rangs espacés de 6 par 6 m (figure VIII.2). Il y a 20 rangs avec 14 arbres sur chaque rang pour un total de 280 unités. La pente de la parcelle est de 0,5 %.

Sol, eau et climat

Le sol est de texture moyenne avec une perméabilité d'environ 4 mm/h, une capacité de rétention de l'humidité de 22 % et une humidité disponible de 150 mm/m de profondeur. Il n'existe aucun risque de salinité ni de toxicité. La source d'eau est un forage existant avec un débit assuré de 5 l/s (18 m³/h). L'eau est de bonne qualité avec une conductivité électrique EC_w = 1,5 dS/m de salinité totale. L'évaporation en bac moyenne atteint 7 mm/jour à la mi-juillet. La saison d'irrigation s'étend d'avril à octobre.

- Nombre maximum de conduites latérales fonctionnant simultanément : 10.
- Nombre de tours par irrigation : 2.
- Durée d'application d'irrigation par tour : environ 6,2 heures.

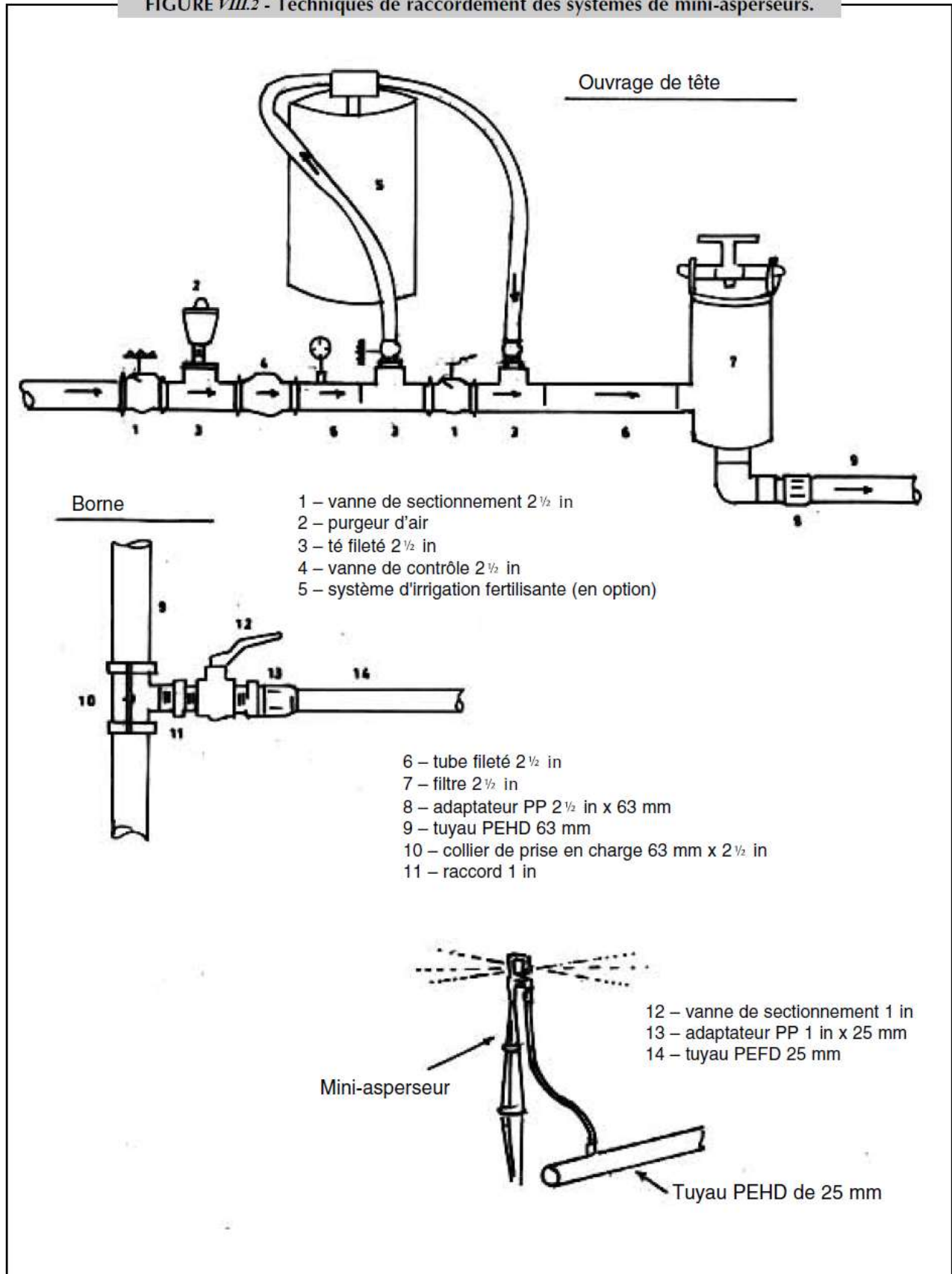
TABLEAU VIII.3- Pression de fonctionnement du système

Pression de fonctionnement du système	Pression (bars)
Pression requise pour le fonctionnement	2,00
Pertes de charge dues au frottement le long de la conduite latérale	0,35
Pertes de charge dues au frottement le long de la conduite principale	0,25
Pertes de charge dues au frottement dans l'ouvrage de tête	0,50
Pertes mineures	0,20
Sous-total	3,30
Différence de niveau	- 0,15
Charge dynamique totale	3,15

TABLEAU VIII.4- Liste des équipements nécessaires

Pièce n°	Description	Quantité
	Réseau de distribution	
1.	Conduite noire PEHD 63 mm , 6 bars	120 m
2.	Tuyau noir PE 25 mm 4 bars	1620 m
3.	Adaptateur PP 2 ½ in x 63 mm	1 U
4.	Adaptateur PP ¾ in x 25 mm	20 U
5.	Bouchon PP 63 mm	1 U
6.	63 mm x ¾ in PP clamp saddle	20 U
7.	Vanne sect. laiton ¾ in	20 U
8.	Mini-asperseur à basse capacité, 120 l/h à 2 bars, cercle complet	280 U
	Sous-total	
	Ouvrage de tête	
9.	Vanne de contrôle laiton 2 ½ in	1 U
10.	Vanne de sectionnement laiton 2 ½ in	2 U
11.	Vanne de sectionnement laiton ¾ in	2 U
12.	Té 2 ½ in (métal galvanisé)	2 U
13.	Raccord galvanisé 2 ¾ in	2 U
14.	Raccord galvanisé ½ in	3 U
15.	Purgeur d'air automatique 1 in	1 U
16.	Filtre à grille (ou disque) 60 «mesh» 2 ½ in	1 U

FIGURE VIII.2 - Techniques de raccordement des systèmes de mini-asperseurs.



Chapitre IX : Irrigation goutte-à-goutte

IX.1. Introduction

En irrigation par goutte-à-goutte, l'eau est appliquée séparément à chaque plante en quantités réduites, précises et fréquentes au moyen d'un distributeur appelé goutteur. Il s'agit de la méthode d'irrigation la plus avancée, avec l'efficacité d'application la plus élevée. L'eau est distribuée en continu au même endroit sous forme de gouttes et s'infiltré dans le sol en humectant la zone racinaire, verticalement par gravité et latéralement par effet de capillarité. La zone plantée n'est que partiellement humidifiée.

Dans les sols moyennement lourds de bonne structure, le mouvement latéral de l'eau sous la surface est plus important que dans les sols sableux (tableau IX.1). En outre, lorsque le débit du goutteur excède le taux d'absorption du sol et sa conductivité hydraulique, l'eau s'accumule en surface. Ceci conduit à une distribution de l'eau plus latérale que verticale. Les valeurs suivantes d'épandage latéral de l'eau sont indicatives :

TABLE IX.1 - Type de sol et rayon moyen d'épandage latéral d'eau des goutteurs

Type de sol	Rayon moyen d'épandage de l'eau
Texture légère	30 cm
Texture moyenne	65 cm
Texture fine	120 cm

IX.2. Trame et composantes du système

Un système intégral d'irrigation par goutte-à-goutte comprend un ouvrage de tête, des conduites principales et secondaires, des bornes, des adducteurs et des conduites latérales équipées de goutteurs.

L'ouvrage de tête (contrôle/commande)

Ses caractéristiques et équipements dépendent des besoins du système. Habituellement il comprend une vanne de sectionnement, des vannes de contrôle, une unité de filtrage, un injecteur d'engrais et d'autres petits accessoires.

Les conduites principales et secondaires

Elles sont généralement enterrées, surtout si elles sont en PVC rigide.

Les bornes

Branchées sur les conduites principales et secondaires, elles sont munies de vannes de sectionnement de 2 ou 3 pouces, et peuvent fournir tout ou partie du débit alimentant les adducteurs.

Les adducteurs

Ce sont généralement des conduites de 50, 63 ou 75 mm de diamètre. S'ils sont en PEHD, ils restent en surface et sont reliés à la borne par des raccords de compression en PP.

Les conduites latérales à goutteurs

Elles sont toujours en PEFD noir flexible de 12–20 mm, PN 3 à 4 bars. Elles sont branchées sur l'adducteur, à des positions fixes, avec de petits raccords en PP, et posées le long des rangées de cultures. Elles sont équipées de goutteurs ou d'autres distributeurs espacés régulièrement (figure IX.1).



Fig IX.1. Adducteur et conduites latérales avec goutteurs

En général, le réseau de distribution (conduites principales, conduites secondaires et adducteurs) est constitué de tuyaux et raccords

thermoplastiques (PVC, PE, PP, etc.) pour des pressions PN 6 et 10 bars. Toutefois, d'autres types de tuyaux peuvent être utilisés pour ces conduites, tels que les tuyaux en acier léger à raccord rapide.

La pression de service variant entre 2 et 3 bars, tous les types d'irrigation par goutte-à-goutte sont classifiés comme systèmes localisés à basse pression, à installation fixe ou saisonnière.

IX.3. Les distributeurs goutte-à-goutte (Goutteurs)

Les goutteurs sont de petits distributeurs en plastique de haute qualité. Ils sont montés à intervalle régulier sur de petits tuyaux flexibles en PE. L'eau pénètre dans les goutteurs sous une pression d'environ 1 bar et ressort sans pression sous forme de gouttelettes continues avec un faible débit de 1 à 24 litres/heure. Les goutteurs sont divisés en deux



Figure IX.2. Goutteurs à multiples sorties

principaux groupes selon la manière dont ils dissipent l'énergie (pression):

- type à orifice, avec une section d'écoulement de 0,2 à 0,35 mm²;
- type à circuit long avec une section d'écoulement plus grande de 1 à 4,5 mm².

Les deux types sont fabriqués avec différents mécanismes et principes de fonctionnement. Tous les goutteurs actuellement disponibles sur le marché sont à écoulement turbulent.

Les goutteurs sont aussi caractérisés par le type de raccordement à la conduite latérale : en dérivation, par insertion dans la paroi du tube à l'aide d'un poinçon, ou en ligne, en tranchant le tube pour insérer le goutteur manuellement ou à l'aide d'un instrument.

Des goutteurs en dérivation à multiples sorties sont aussi disponibles avec des sorties à quatre ou six tubes de type « spaghetti ». (Figure IX.2)

Les spécifications suivantes doivent être données par le fournisseur :

- débit du goutteur pour la pression de fonctionnement recommandée, normalement 1 bar ;
- débit du goutteur en fonction des variations de pression et longueur optimale de la ligne de goutteurs avec différents espacements et pentes ;
- type de raccordement ;
- besoins en filtration ;
- coefficient de variation (variabilité de fabrication des goutteurs).

Alors que certains types de goutteurs sont montés sur le tuyau en usine, d'autres peuvent être achetés séparément et montés sur le tuyau en fonction des besoins.

IX.4. Gaines de micro-irrigation

Il s'agit de lignes de tuyaux à paroi mince avec des points d'émission espacés de 10, 20, 30 ou 45 cm ou tout autre espacement, fournissant de plus faibles débits que les goutteurs habituels à de très faibles pressions, c'est-à-dire 0,4 à 1 litre/heure sous 0,6 à 1 bar. Ce sont des tuyaux à goutteurs intégrés car les goutteurs sont posés dans les parois du tuyau à des intervalles fixés à la fabrication. Ces gaines constituent des conduites latérales avec goutteurs prêts à l'emploi qui offrent une uniformité d'application très élevée. Elles sont en PEFD ou en tout autre type de PE souple et existent en divers diamètres de 12 à 20 mm et en plusieurs épaisseurs de parois

(0,1 à 1,25 mm). Grâce à un système de filtration incorporé dans le tube, elles sont moins sensibles au bouchage mécanique ou biologique que les goutteurs conventionnels.

IX.5. Tuyaux à parois poreuses

Ces tuyaux de petit diamètre (environ 16 mm) sont des tubes flexibles à parois minces poreuses en fibres de PE, en PVC, ou en caoutchouc. Ils permettent le passage à basse pression de l'eau et des éléments nutritifs par transpiration au travers du tube, qui vont irriguer les plantes. Le débit dans les tuyaux poreux n'est pas précis, car la dimension des pores est variable et instable. Ils sont utilisés comme tuyaux latéraux goutteurs en dessous de la surface. L'application de cette technique est limitée, bien qu'elle offre quelques avantages.

IX.6. Filtration

La filtration de l'eau d'irrigation est d'une importance majeure pour l'application normale de ce système. Les impuretés solides contenues dans l'eau doivent être éliminées par une filtration efficace pour éviter que les goutteurs ne soient endommagés par engorgement. Le type de filtration dépend du type d'impuretés et du degré de filtrage requis.

IX.7. Programmation de l'irrigation

En irrigation par goutte-à-goutte, Le tarissement de l'humidité du sol ne doit pas excéder 40 % de l'humidité disponible du sol dans le dernier stade de croissance des légumes et des arbres fruitiers, et 20 à 30 % dans les stades précédents pour les légumes. Toutefois, pour obtenir des rendements supérieurs, la pratique courante est d'irriguer chaque jour dans les derniers stades. Il est possible de programmer l'irrigation de manière appropriée en utilisant des tensiomètres pour indiquer la tension d'humidité du sol dans la zone racinaire.

IX.8. Critères et considérations de conception

L'irrigation goutte-à-goutte est principalement appliquée aux cultures intensives plantées en rangées (légumes, arbres fruitiers, melons, bananes, fleurs, raisins, etc.). Elle n'est pas recommandée pour les pommes de terre, les salades, les légumes à feuilles, les arachides, la luzerne, et les autres cultures à plantation dense, bien qu'elle puisse être parfois utilisée avec succès pour ces cultures.

Les goutteurs et/ou l'espacement des conduites latérales sont directement liés à l'espacement de plantation des cultures. Pour la plupart des cultures de légumes, l'espacement des goutteurs correspond à l'intervalle intercultures, c'est-à-dire un goutteur par plante et une conduite latérale de goutteurs par rang de plantes. Avec les gaines de micro-irrigation il existe plusieurs points de distribution par plante afin d'assurer une bande

humide continue le long de la ligne de cultures ; dans ce cas on dispose une gaine de micro-irrigation par rang de plantes.

Lorsque la culture est plantée de manière dense en planches, une conduite latérale de goutteurs pour deux rangs peut être mise en place avec de bons résultats.

Dans les vergers où les arbres sont très espacés, l'espacement des goutteurs diffère de celui adopté pour les légumes. Comme la surface du sol n'est que partiellement mouillée, seule une partie du système racinaire est également mouillée. Le principal objectif est de mouiller le plus grand volume possible de sol par arbre (volume de système racinaire), pas moins de 35 %, tout en évitant la percolation en profondeur, au-delà de 50–60 cm, qui est la profondeur moyenne des racines des arbres fruitiers sous irrigation goutte-à-goutte. Ce pourcentage de 35 % correspond environ à une superficie de sol de 10 à 12 m², avec un espacement des arbres de 5 x 6m ou 6 x 6m. À partir de ce principe et des chiffres indicatifs sur l'épandage latéral de l'eau, les projets de conduites latérales avec goutteurs dans un verger d'arbres se fonderont sur les éléments suivants :

- ligne simple par rangée d'arbres, avec environ 4 à 8 goutteurs tous les 0,80 à 1,20 m le long de la ligne ;
- tracé circulaire, ou en boucle autour de l'arbre. Cette disposition compte une ligne simple par rangée et, pour chaque arbre, soit une plus petite ligne d'extension avec cinq à huit goutteurs autour de l'arbre, soit un goutteur à multiples sorties avec quatre à six petits tubes s'étendant radialement autour de l'arbre. Le diamètre du cercle varie de 1,2 à 2,2 m. Les arbres nouvellement plantés peuvent être munis de deux goutteurs seulement de chaque côté du bassin, à 35–40 cm du tronc de l'arbre ;
- double ligne par rangée de plantes. Ce schéma est appliqué dans les plantations de bananiers, avec deux lignes de goutteurs par rang d'arbres, une de chaque côté, implantées à environ 1,2 à 1,6 m de l'arbre. Les goutteurs le long de la ligne sont alors respectivement espacés de 0,7 à 1,2 m

IX.9. Coûts

Le coût des conduites (tous les tuyaux, y compris les conduites latérales) représente 45 % du coût total. L'ouvrage de tête représente 30 % du coût total.

IX.10. Avantages

- Économie d'eau. La superficie plantée est partiellement humidifiée, mais précisément et avec une quantité d'eau contrôlée.

- Utilisation de ressources en eau salée. Le goutte-à-goutte permet de maintenir de faibles tensions d'humidité du sol dans la zone racinaire de manière continue avec des applications faibles mais fréquentes.

Les sels dissous s'accumulent à la périphérie de la masse de sol humide et les plantes peuvent facilement puiser l'eau dont elles ont besoin. Ceci permet l'utilisation d'eaux contenant plus de 3 000 mg/l de quantité totale de matière dissoute, ce qui serait impossible avec d'autres méthodes.

- Utilisation sur des sols marginaux. De petites parcelles irrégulières marginales, éloignées en raison du morcellement des terres et présentant des topographies variables et des sols peu profonds très caillouteux, peuvent être productives avec les techniques de goutte-à-goutte qui livrent directement aux plantes les quantités nécessaires d'eau et d'éléments nutritifs.

- Les faibles besoins en main-d'œuvre, la lutte réduite contre les mauvaises herbes et le fonctionnement ininterrompu font également partie des avantages de la méthode.

IX.11. Inconvénients

- Coût initial assez élevé.
- Une gestion rationnelle de l'irrigation est indispensable pour un fonctionnement satisfaisant du système, l'application de la fertilisation et l'entretien de l'équipement de l'ouvrage de tête (filtres, injecteurs, etc.).
- Engorgement des goutteurs. Le premier obstacle à la réussite de l'introduction des techniques d'irrigation par goutte-à-goutte dans les pays en voie de développement est le colmatage mécanique des goutteurs dû à un filtrage insuffisant des impuretés de l'eau d'irrigation.

IX.12. Exemple de projet : Irrigation goutte-à-goutte

Superficie et cultures

La parcelle, de 120 x 85 m (environ un hectare), porte une culture à ciel ouvert de pastèques en rangs espacés de 2,20 m, avec un espacement de 50 cm entre chaque plante. La parcelle est divisée en deux parties de 54 rangs de 40,5 m chacune ; à raison de 81 plantes par rang, cela donne 4 374 plantes par 1/2 partie, 8 748 au total et 108 rangs plantés.

Sol, eau et climat

Sol de texture lourde à faible perméabilité (environ 6 mm/h) et une capacité de rétention de l'humidité élevée. La source d'eau est un réservoir à ciel ouvert situé à proximité ; l'eau est de bonne qualité mais contient une

grande quantité d'impuretés d'origine organique (algues). La saison culturale va de début avril à début juillet ; les mesures maximums moyennes de l'évaporation en bac sont de 3,3 mm/jour pour avril, 4,64 mm/jour pour mai et 6,13 mm/jour pour juin.

Besoins en eau et programme d'irrigation

Les besoins maximums en eau de la pastèque surviennent durant le stade de mi-croissance et de formation du fruit à la fin mai et au début juin, lorsque la valeur de k_c est de 1. La valeur moyenne relevée pour les deux mois est de 5,38 mm/jour ce qui, multiplié par un facteur de correction de 0,66, donne une E_{To} de 3,55 mm/jour, équivalente à l' E_{Tc} puisque $k_c = 1$. L'efficacité d'application atteint 90 %.

Par conséquent, le besoin quotidien brut de pointe est de:

$$3,55 \div 90 \times 100 = 3,94 \text{ mm/jour}$$

$$3,94 \times 10 \times 1 \text{ ha} = 39,4 \text{ m}^3/\text{jour}$$

Le programme d'irrigation à la fin mai n'est pas fixé en fonction d'un tarissement fixe de l'humidité du sol, mais d'un intervalle fixe d'une journée. En conséquence l'irrigation est appliquée chaque jour avec une dose de 39,5 m³/jour. Au stade initial de la saison de croissance, l'intervalle d'irrigation varie entre quatre et deux jours.

Trame du système

Le système comprend un ouvrage de tête équipé d'un filtre à gravier et d'une crépine, d'un injecteur à fertilisant et d'une vanne de réglage. La conduite principale en PEHD est posée au milieu du champ en surface. Sur celle-ci, qui joue aussi le rôle d'adducteur, on installe 54 bornes, espacées de 2,2 m. Les conduites latérales connectées aux bornes sont des tuyaux en PEFD de 16 mm posés perpendiculairement à la conduite principale des deux côtés, un par rangée de plantes. Afin d'alimenter des plantes ou surfaces particulières, des goutteurs additionnels séparés sont insérés dans les conduites latérales tous les 50 cm, un par plante.

Caractéristiques des goutteurs

- en dérivation : 4 litres/heure à 1 bar;
- filtration requise de 100 µm

Caractéristiques des conduites latérales

- tuyaux en PEFD de 16 mm, PN 4 bars, longueur 41 m;
- nombre de goutteurs : 81;
- débit total : 324 litres/heure;
- nombre de conduites latérales : 108;
- nombre total de goutteurs : 8 748.

Fonctionnement du système

Le débit requis pour le fonctionnement simultané des conduites latérales est de 35 m³/h. Si une irrigation est effectuée en 3 tours, le débit de l'installation est de 12 m³/h, un débit raisonnable pour une superficie de 1 ha. La durée d'application par tour en pointe pour une dose d'irrigation de 39,5 m³ est d'une heure six minutes ; une irrigation complète prendra trois heures et dix-huit minutes (figures IX.3 et IX.4).

Pression de fonctionnement

La pression requise pour le fonctionnement normal doit être conforme aux tableaux suivants (tableaux IX.2 et IX.3).

TABLEAU IX.2 - Pression de fonctionnement du système

Pression de fonctionnement du système	Pression (bars)
Pression requise pour les goutteurs	1.00
Pertes de charge dues au frottement dans les conduites latérales	0.10
Pertes de charge dues au frottement dans les conduites principales	0.43
Pertes de charge dues au frottement dans l'ouvrage de tête	0.90
Pertes de charge mineures	0.22
Charge dynamique totale (pression) du système	2.65

TABLEAU IX.3 - Liste des équipements nécessaires		
Pièce n°	Description	Quantité
Réseau de distribution		
1.	Conduites PEHD 63mm, 6 bars	180 m
2.	Tuyaux PEFD 16mm, 4 bars	4430 m
3.	Goutteurs 4 l/h, 1 bar	8750 U
4.	Adaptateur PP 63 mm x 2 in	1 U
5.	Adaptateur PP 16 mm x ¼ in	108 U
6.	Coude PP 63 mm	1 U
7.	Bouchon PP 63 mm	1 U
8.	Collier de prise en charge PP 63 mm x ¼ in	54 U
9.	Raccord ¼ in (acier galvanisé ou PVC)	54 U
10.	Té ¼ in (acier galvanisé ou PVC)	54 U
11.	Vanne sectionnement laiton ¼ in	108 U
Sous-total		
Ouvrage de tête		
12.	Vanne de contrôle laiton 2 in	1 U
13.	Vanne de sectionnement laiton 2 in	2 U
14.	Vanne de sectionnement laiton ¼ in	2 U
15.	Té 2 in (acier galvanisé ou PVC)	3 U
16.	Raccord 2 in	4 U
17.	Raccord ¼ in	4 U
18.	Purgeur d'air 1 in	1 U
19.	Filtre gravier complet 2 in	1 U
20.	Filtre à disque 2 in avec jauges, etc.	1 U
21.	Injecteur à engrais complet, max. 150 l/h	1 U

goutte-à-goutte de la pastèque.

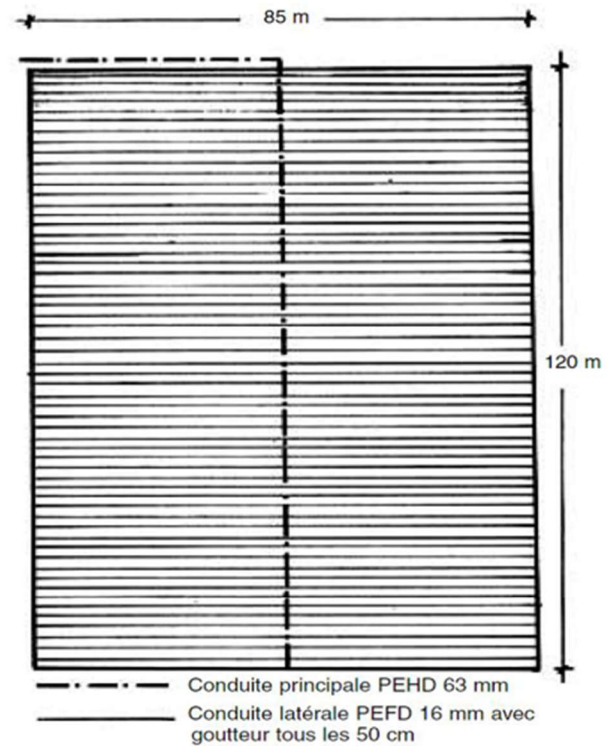


Figure IX.3. Exemple de projet d'irrigation par

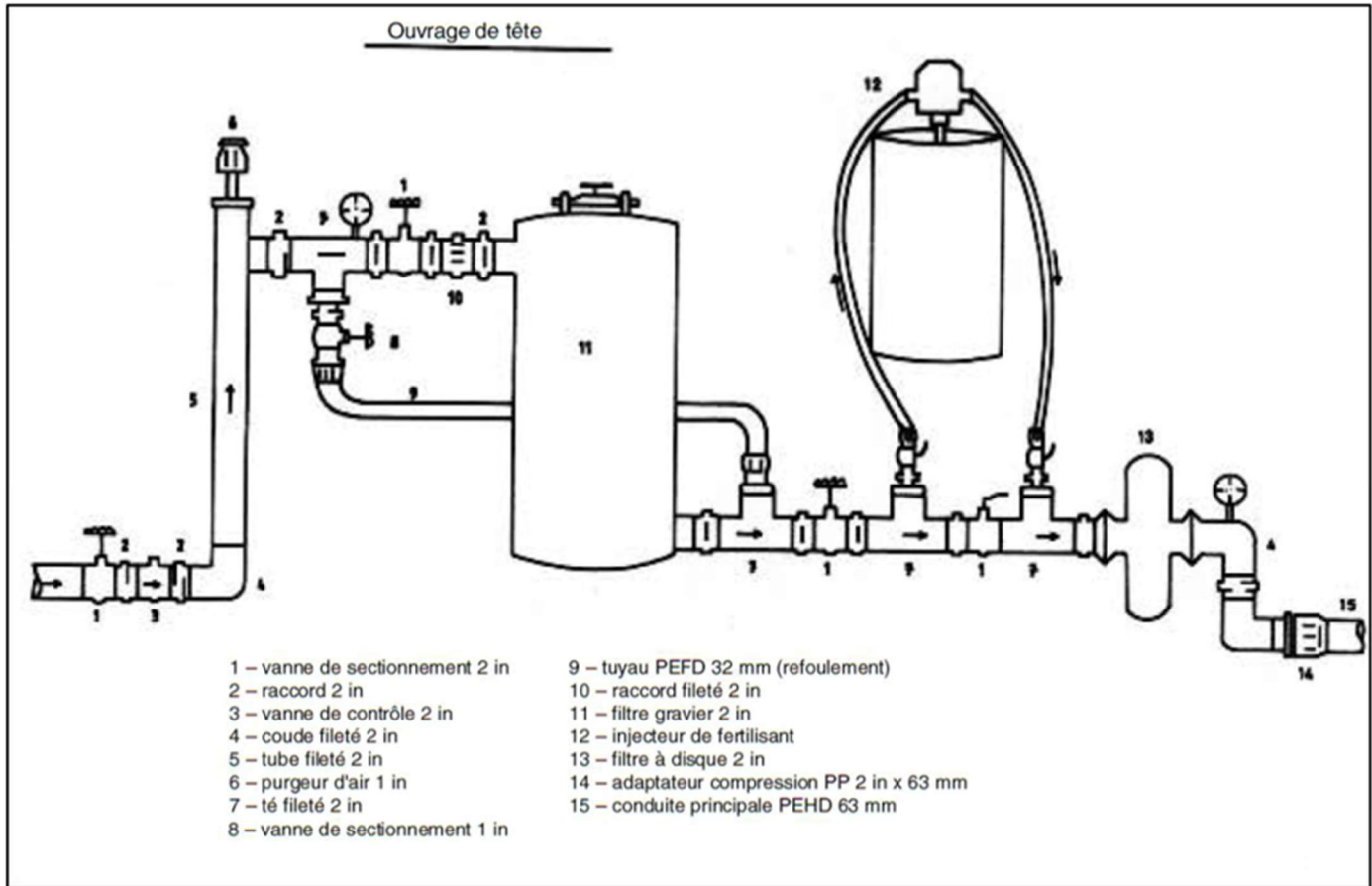


Figure IX.4. Ouvrage de tête dans l'irrigation par goutte-à-goutte

Deuxième partie : Gestion des périmètres d'irrigation

Chapitre I : Cadre général des périmètres d'irrigation

I.1. Introduction

Les périmètres irrigués sont des zones de culture spécifiquement aménagées et équipées pour bénéficier d'un apport d'eau contrôlé, essentiel pour l'agriculture dans les régions où les ressources en eau sont limitées ou saisonnières. Ils sont un pilier majeur de l'agriculture moderne et jouent un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire, l'augmentation des rendements agricoles et la gestion durable de l'eau.

Cette partie du cours vise à présenter les différents aspects des périmètres irrigués : leur définition, leur importance, leur gestion, et les enjeux environnementaux, économiques et sociaux qui leur sont associés.

I.2. Définition du périmètre irrigué

Un périmètre irrigué est une superficie de terres agricoles où l'eau est apportée de manière artificielle, via un réseau d'irrigation, pour répondre aux besoins en eau des cultures. Cette irrigation peut être réalisée par différents moyens : canaux, pompes, goutte-à-goutte, etc.

I.3. Types de Périmètres Irrigués

Les périmètres irrigués peuvent être classés selon plusieurs critères : leur taille, leur mode de gestion et les sources d'eau utilisées.

I.3.1. Classification selon la taille

Petit périmètre irrigué : Zones de taille modeste gérées par de petits exploitants agricoles, souvent avec un système d'irrigation simple.

Grand périmètre irrigué : Zones à grande échelle, souvent gérées par des organisations ou des entités publiques avec des infrastructures complexes.

I.3.2. Classification selon le mode de gestion

Gestion privée : Le périmètre est géré par les exploitants eux-mêmes.

Gestion publique : Les autorités publiques gèrent le périmètre irrigué.

Gestion communautaire : Les communautés locales participent activement à la gestion du système d'irrigation.

I.3.2. Classification selon la source d'eau

Eaux superficielles : Rivières, lacs, réservoirs.

Eaux souterraines : Forages, puits, pompage.

I.4. Importance des périmètres irrigués

- **Accroître la production agricole** : L'irrigation permet de cultiver des plantes dans des zones où la pluie n'est pas suffisante ou régulière.
- **Sécuriser les récoltes** : Réduire la dépendance aux aléas climatiques.
- **Améliorer la productivité** : Obtenir des rendements plus élevés et réguliers.
- **Diversifier la production** : Permettre la culture de variétés sensibles à la sécheresse.

I.5. Gestion des périmètres irrigués

I.5.1. Planification et conception : Un bon périmètre irrigué nécessite une planification rigoureuse, notamment en matière de :

- **Aménagement des terres** : Adaptation des terrains à l'irrigation (terrains plats, préparation du sol).
- **Dimensionnement des infrastructures** : Calcul des besoins en eau, de la capacité des réservoirs, du nombre de canaux et des pompes nécessaires.

I.5.2. Gestion de l'eau : La gestion de l'eau est au cœur du bon fonctionnement d'un périmètre irrigué. Cela comprend :

- **Planification des apports en eau** : Estimation précise des besoins des cultures en fonction du climat et du type de sol.
- **Distribution équitable de l'eau** : Prévenir les conflits entre les exploitants agricoles.
- **Gestion des ressources en eau** : Réduction des pertes et optimisation des rendements.

I.5.3. Gestion financière et sociale : Les périmètres irrigués nécessitent souvent des investissements importants. Il est donc important d'assurer une gestion financière transparente et de prévoir des modèles de financement durables.

I.6. Enjeux des périmètres irrigués

I.6.1. Enjeux environnementaux

- **Gestion durable de l'eau** : Le sur-arrosage ou une gestion inefficace des ressources peuvent entraîner des problèmes comme la salinisation des sols.
- **Érosion et dégradation des sols** : L'irrigation mal gérée peut entraîner des risques de dégradation des sols.

I.6.2. Enjeux économiques

- **Rentabilité** : Les périmètres irrigués nécessitent des investissements pour construire et entretenir les infrastructures. Il est important de garantir la rentabilité des exploitations agricoles.
- **Emploi rural** : L'irrigation peut soutenir l'emploi local en fournissant des opportunités économiques dans les zones rurales.

I.6.3. Enjeux sociaux

- **Accès à l'eau** : Il est crucial de garantir un accès équitable à l'eau pour tous les exploitants agricoles.
- **Conflits d'usage** : Des tensions peuvent surgir entre les différents utilisateurs de l'eau, notamment entre les agriculteurs et les autres secteurs de la société.

I.7. Perspectives d'avenir et innovations

Les nouvelles technologies, telles que les capteurs d'humidité, les drones et les systèmes d'irrigation intelligents, permettent de mieux gérer les ressources en eau, d'augmenter les rendements et de minimiser l'impact environnemental. L'utilisation d'énergies renouvelables pour l'irrigation, comme les panneaux solaires, devient également une tendance croissante.

I.7.1. Irrigation intelligente : Des systèmes automatisés et téléguidés permettent de mieux contrôler les apports en eau en fonction des besoins réels des cultures.

I.7.2. Agriculture durable : Il est essentiel d'adopter des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement et de l'équilibre des écosystèmes pour garantir la pérennité des périmètres irrigués.

I.8. Conclusion

Les périmètres irrigués jouent un rôle fondamental dans l'agriculture moderne, particulièrement dans les régions arides ou semi-arides. Toutefois, leur succès dépend de la mise en place d'une gestion efficace et durable des ressources en eau, ainsi que de l'implication des communautés locales. L'évolution des technologies offre de nouvelles opportunités pour améliorer la productivité agricole tout en respectant l'environnement.

Chapitre II : Analyse diagnostique du réseau existant

II.1. Introduction

L'analyse diagnostique du réseau d'irrigation existant est une étape essentielle pour évaluer ses performances, identifier les problèmes et proposer des solutions d'amélioration. Ce chapitre vise à examiner l'état actuel du réseau, sa capacité à répondre aux besoins des agriculteurs et son efficacité en termes de gestion de l'eau.

II.2. Description du réseau existant

Le réseau d'irrigation concerné se compose de plusieurs infrastructures destinées à capter, transporter et distribuer l'eau aux parcelles agricoles. Il comprend :

- Les ouvrages de captage (barrages, forages, puits, stations de pompage)
- Les canaux d'adduction (principaux et secondaires)
- Les systèmes de distribution (canaux tertiaires, réseaux sous pression)
- Les dispositifs de régulation et de contrôle (vannes, régulateurs de débit, capteurs)

II.3. Analyse technique : L'analyse technique repose sur plusieurs critères :

- L'état physique des infrastructures : usure, fuites, obstruction
- La capacité de transport et de distribution : conformité aux besoins hydriques des agriculteurs
- L'efficacité hydraulique : pertes d'eau, pressions et débits effectifs
- Le mode de gestion et d'entretien : fréquence et qualité des interventions.

II.4. Contraintes et dysfonctionnements : Les principales contraintes et dysfonctionnements identifiés incluent :

- Pertes d'eau importantes dues aux fuites et à l'infiltration
- Envasement et obstruction des canaux
- Mauvaise gestion des ressources hydriques et conflits d'usage
- Problèmes de maintenance et d'exploitation
- Insuffisance des infrastructures pour couvrir les besoins croissants.

II.5. Perspectives : Afin d'améliorer la performance du réseau d'irrigation, plusieurs actions peuvent être envisagées :

- Réhabilitation et modernisation des infrastructures existantes
- Amélioration des pratiques de gestion de l'eau (techniques d'irrigation plus efficaces)
- Renforcement des capacités des gestionnaires et usagers par des formations
- Mise en place d'un système de suivi et d'entretien préventif.

II.6. Conclusion

L'analyse du réseau existant met en évidence les points forts et les faiblesses du système d'irrigation. Une approche concertée entre les différents acteurs permettra de garantir une gestion durable et efficace des ressources en eau, au bénéfice de la production agricole et de la préservation de l'environnement.

Chapitre III : Formulation d'un projet de réhabilitation ou de modernisation

III.1 Introduction

La réhabilitation ou la modernisation des périmètres irrigués est une nécessité pour assurer une gestion durable des ressources en eau, améliorer les rendements agricoles et garantir une utilisation efficiente des infrastructures hydrauliques. Ce chapitre expose la méthodologie de formulation d'un projet de réhabilitation, en intégrant les aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux.

III.2 Diagnostic et évaluation

III.2.1 État des infrastructures

- Inventaire des infrastructures hydrauliques (canaux, stations de pompage, réseaux de distribution, drainage, etc.).
- Identification des dysfonctionnements et des pertes d'eau.
- Analyse des besoins en maintenance et en modernisation.

III.2.2 Analyse de la gestion de l'eau

- Évaluation de l'efficacité de l'irrigation.
- Détection des fuites et des inefficacités dans la distribution.
- Étude des pratiques culturales et des besoins en eau des cultures.

III.2.3 Impact socio-économique

- Étude des usages de l'eau par les agriculteurs.
- Analyse des coûts de gestion et des capacités de financement des exploitants.
- Impact de la réhabilitation sur la productivité agricole et le revenu des agriculteurs.

III.3 Définition des objectifs du projet

- Amélioration de l'efficacité de l'irrigation et réduction des pertes en eau.
- Augmentation de la productivité agricole.
- Renforcement de la résilience face aux changements climatiques.
- Réduction des coûts d'exploitation et de maintenance.
- Amélioration des conditions socio-économiques des agriculteurs.

III.4 Choix des solutions techniques

III.4.1 Modernisation des infrastructures

- Réhabilitation des canaux et conduites d'eau.
- Installation de systèmes d'irrigation modernes (goutte-à-goutte, aspersion, micro-irrigation)
- Automatisation et télégestion des réseaux d'irrigation.

III.4.2 Optimisation de la gestion de l'eau

- Introduction de techniques de gestion intégrée des ressources en eau.
- Utilisation de capteurs d'humidité et d'outils d'aide à la décision pour une irrigation de précision.

III.4.3 Adoption de pratiques agricoles durables

- Formation des agriculteurs à l'utilisation rationnelle de l'eau.
- Encouragement de la diversification des cultures et de l'agriculture de conservation.

III.5 Plan de mise en œuvre

III.5.1 Programmation des travaux

- Élaboration d'un calendrier des interventions.
- Définition des priorités en fonction de l'urgence des besoins.

III.5.2 Mobilisation des ressources financières

- Identification des sources de financement (État, bailleurs de fonds, fonds privés, subventions).
- Estimation des coûts et planification budgétaire.

III.5.3 Mécanismes de gouvernance et de suivi

- Création de comités de gestion des périmètres irrigués.
- Mise en place de systèmes de suivi-évaluation pour mesurer l'impact des actions.
- Implication des agriculteurs et des parties prenantes dans la gouvernance.

III.6 Évaluation des impacts et perspectives

- Analyse des gains en efficacité et en productivité.
- Étude des effets sur la préservation des ressources hydriques.
- Évaluation de l'amélioration des conditions de vie des agriculteurs.

- Perspectives d'évolution et d'adaptation aux futurs défis climatiques et économiques.

III.7 Conclusion

Un projet de réhabilitation ou de modernisation des périmètres irrigués repose sur un diagnostic approfondi, la définition d'objectifs clairs et la mise en place de solutions adaptées aux enjeux locaux. Son succès dépend d'une approche intégrée impliquant les acteurs locaux, les agriculteurs et les institutions de gestion de l'eau.

Références bibliographiques

1. Béthery, J. (1990). Réseaux collectifs d'irrigation ramifiés sous pression calcul et fonctionnement (p. 139). Cemagref Editions.
2. Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., & Heibloem, M. (1990). Méthodes d'irrigation. FAO, Italy.
3. Clément, R., & Galand, A. (1979). Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression.
4. Ducroq, M. (1980). Les bases de l'irrigation. Éditions Tec et Doc, Lavoisier.117p.
5. FAO, 2008- Manuel des techniques d'irrigation sous pression, 308p.
6. Le Métayer, J., Usages, U. G. E. G. A., Garin, P., & Montginoul, M. (2023). L'opportunité d'une réhabilitation des réseaux d'irrigation sous pression: quels sont les effets et services joints liés à leur présence sur un territoire?(Identification et quantification).
7. Mathieu, C., Audoye, P., & Chossat, J. C. (2007). Bases techniques de l'irrigation par aspersion. Éditions Tec et Doc, Lavoisier.
8. Ollier, C., & Poirée, M. (1981). Irrigation, les réseaux d'irrigation théorie, technique et économie des arrosages. 5ème. Erolles. Paris. 503p.
9. Phocaidès, A. (2008). Manuel des techniques d'irrigation sous pression.
10. Van Laere, P. E. (2003). Mémento de l'irrigation. Bruxelles-Belgique: Ingénieurs Assistance Internationale-Ingénieurs sans Frontières, 2005-2006.
11. Vrignat, P., Duculty, F., & Limousin, S. (2017). Suivi d'une campagne d'irrigation par un enrouleur d'arrosage via un SmartPhone. La Revue E, 3, 41-50.