

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis-Miliana



Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre
Département: Sciences Agronomiques

POLYCOPIE

Irrigation et drainage

Préparé par :

Dr : Merouche Abdelkader

Destiné aux étudiants de troisième année licence en Production végétale

Année Universitaire : 2024/2025

Avant-propos

Ce polycopié est conçu pour les étudiants de troisième année de licence en production végétale, tout en servant de ressource pédagogique essentielle pour ceux issus d'autres spécialités au sein de la filière des sciences agronomiques. Le cours se déroule durant le semestre 5 et s'inscrit dans l'Unité d'Enseignement Fondamentale 1 (UEF 3.1.1), attribuant 4 crédits avec un coefficient de 2.

Élaboré à partir d'une variété de ressources bibliographiques, y compris des ouvrages, des articles académiques et des rapports d'organisations internationales telles que l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), cet enseignement met en lumière l'importance primordiale de l'eau dans la production végétale. En effet, l'eau est le facteur clé déterminant les rendements agricoles et représente la principale source de variabilité interannuelle. Il est également crucial de reconnaître que les différentes espèces végétales affichent des degrés de sensibilité variés aux conditions hydriques, qu'il s'agisse de déficits ou d'excès.

Le cours est divisé en deux parties distinctes. La première traite des principes fondamentaux de l'irrigation, incluant des concepts généraux et la distribution de l'eau à la parcelle, en lien avec les principales techniques d'arrosage. Les étudiants développeront des compétences pour gérer efficacement les réseaux d'irrigation, en prenant en compte des éléments essentiels comme les besoins en eau des cultures et les propriétés hydrodynamiques des sols. Les méthodes de distribution à la parcelle, telles que l'irrigation gravitaire, l'irrigation par aspersion et la micro-irrigation, seront également abordées. Cette partie est composée de deux chapitres:

- **Chapitre 1 : Les éléments fondamentaux**
- **Chapitre 2 : Distribution à la parcelle**

La seconde partie met l'accent sur le drainage, un aspect essentiel pour la durabilité des systèmes agricoles. Les chapitres exploreront les impacts des excès d'eau sur les plantes et les sols, les méthodes d'assainissement, ainsi que les principes de drainage souterrain et de surface. Cette section approfondira les techniques d'installation, les risques de colmatage et l'étude des réseaux d'assainissement des sols, et se divisera en quatre chapitres

- **Chapitre 1 : Excès d'eau et techniques d'assainissement**
- **Chapitre 2 : Drainage souterrain**
- **Chapitre 3 : Drainage de surface**
- **Chapitre 4 : Réseau d'assainissement des sols**

Table des matières

Introduction générale	1
Partie 1 : Irrigation	2
Chapitre 1 : Les éléments fondamentaux	2
1.1 Généralités.....	2
1.2 Techniques d'arrosage.....	7
1.3 Réseaux d'irrigation.....	8
1.3.1 Composantes des réseaux d'irrigation.....	8
1.3.2 Entretien des réseaux d'irrigation.....	12
1.4 Paramètres de dimensionnement d'un réseau d'irrigation.....	13
1.5 Problèmes de la salinité et tolérances des cultures en sels	15
1.5.1 Problèmes de la salinité.....	15
1.5.2 Tolérances des cultures en sels.....	16
Chapitre 2 : Distribution à la parcelle	18
2.1 Généralités.....	18
2.2 Rétention de l'eau par le sol.....	18
2.2.1 Forces de rétention.....	18
2.2.2 Humidité du sol.....	21
2.2.3 Niveaux d'humidité critiques du sol.....	22
2.2.4 Courbe de rétention de l'eau par le sol.....	23
2.3 Irrigation des cultures.....	25
2.3.1 Réserves en eau du sol.....	25
2.3.1.1 Réserve utile.....	25
2.3.1.2 Réserve facilement utilisable.....	26
2.3.1.3 Exemple d'application.....	26
2.3.2 Besoins en eau des cultures.....	27
2.3.3 Doses et fréquences d'irrigation.....	31
2.3.4 Déficits en eau.....	31
2.3.5 : Débit fictif continu et débit caractéristique.....	32
2.3.5.1 Débit fictif continu moyen.....	33
2.3.5.2 Débit caractéristique.....	33
2.3.5.3 Exemple d'application.....	34
2.4 Irrigation gravitaire.....	35
2.4.1 Irrigation par ruissellement ou déversement.....	36
2.4.1.1 principe.....	36
2.4.1.2 Paramètres caractéristiques.....	37

2.4.1.3 Exemple d'application.....	38
2.4.2 Irrigation à la raie.....	40
2.4.2.1 Description générale.....	40
2.4.2.2 Caractéristiques appropriées.....	42
2.4.3 Irrigation par submersion.....	43
2.4.3.1 Principe.....	43
2.4.3.2 Eléments caractéristiques des bassins de submersion.....	43
2.4.3.3 Exemple d'application.....	45
2.5 Irrigation par aspersion.....	45
2.5.1 Principe.....	45
2.5.2 : Avantages et inconvénients de l'aspersion.....	46
2.5.3 Composantes et types d'installation de l'aspersion.....	48
2.5.3.1 Composantes du système d'aspersion.....	48
2.5.3.2 Types d'installation du système d'aspersion.....	52
2.5.3.3 Dispositions des asperseurs et uniformité de l'irrigation.....	52
2.5.4 Théorie de l'aspersion.....	53
2.5.4.1 Principe de l'irrigation rationnelle.....	57
2.5.4.2 Calcul des paramètres caractéristiques.....	57
2.5.4.3 Exemple d'application.....	57
2.6 Micro-irrigation.....	58
2.6.1 Principe.....	60
2.6.2 Avantages et inconvénients de l'irrigation goutte à goutte.....	60
2.6.3 Eléments d'un réseau d'irrigation goutte à goutte.....	61
2.6.4 Théorie de l'irrigation goutte à goutte.....	61
2.6.4.1 Uniformité de l'irrigation.....	67
2.6.4.2 Dose d'irrigation.....	67
2.6.4.3 Durée d'irrigation.....	68
2.6.4.4 Exemple d'application.....	69
Partie 2 : Drainage.....	69
Chapitre 1 : Excès d'eau et techniques d'assainissement.....	70
1.1 Effets des excès d'eau sur les plantes et le sol.....	71
1.2 Effets des excès d'eau sur les cultures et les exploitations.....	72
1.3 Origine des excès d'eau.....	73
1.4 Méthodes d'assainissement.....	73
1.4.1 Drainage par fossés.....	73
1.4.1.1 Fossés ouverts.....	74

1.4.1.2 Fossés Couverts.....	75
1.4.2 Drainage par tuyaux enterrés.....	75
1.4.3 Drainages spéciaux.....	75
1.4.3.1 Travail du sol (sous-solage).....	76
1.4.3.2 Taupage.....	75
Chapitre 2 : Drainage souterrain.....	76
2.1 Principes.....	76
2.2 Tuyaux de drainage.....	76
2.2.1 Types de tuyaux.....	76
2.2.2 Diamètres des tuyaux.....	78
2.2.3 Débit à évacuer par les drains tertiaires.....	78
2.2.4 Exemple d'application.....	79
2.2.5 Paramètres de dimensionnement.....	80
2.3 Machines de pose.....	81
2.4 Risques de colmatage.....	84
2.5 Disposition des drains.....	85
Chapitre 3 : Drainage de surface.....	87
3.1 Principes.....	87
3.2 Modelé du terrain.....	87
3.3 Collecte et évacuation des eaux.....	89
Chapitre 4 : Réseau d'assainissement des sols.....	89
4.1 Tracé du réseau de collecteurs.....	89
4.2 Dimensionnement des collecteurs.....	91
4.2.1 Forme générale.....	91
4.2.2 Section mouillée du collecteur trapézoïdal.....	93
4.2.3 Périmètre mouillée du collecteur trapézoïdal.....	93
4.2.4 Rayon hydraulique du collecteur.....	94
4.2.5 Vitesse d'écoulement de l'eau.....	94
4.2.6 Débit à évacuer par le collecteur.....	95
4.2.7 Exemple d'application.....	96
4.3 Raccordements.....	98
4.4 Effets généraux de l'assainissement.....	99
Références.....	100

Introduction générale

L'eau constitue une ressource essentielle pour l'agriculture, jouant un rôle fondamental dans la production végétale et influençant directement les rendements des cultures. Sa disponibilité et sa qualité sont des facteurs déterminants pour la croissance saine des plantes, leur développement et leur capacité à résister aux maladies. Dans un monde où la population continue de croître, les besoins en nourriture augmentent parallèlement, ce qui rend la gestion efficace de l'eau d'autant plus cruciale.

Ce cours met en lumière l'importance cruciale de la gestion de l'eau dans le contexte actuel, marqué par des enjeux de sécurité alimentaire croissants et des variations climatiques significatives. Les événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses et les inondations, perturbent les cycles agricoles et menacent la production alimentaire mondiale. Par conséquent, une approche intégrée de l'irrigation et du drainage est essentielle pour optimiser l'utilisation de l'eau, garantir des rendements durables et préserver les ressources pour les générations futures.

En explorant les techniques modernes d'irrigation, les systèmes de drainage efficaces et les pratiques de conservation de l'eau, ce cours vise à fournir aux étudiants les compétences nécessaires pour relever ces défis contemporains. L'objectif est de former des académiques capables de concevoir et de mettre en œuvre des stratégies innovantes qui favoriseront une agriculture résiliente et durable, tout en respectant les écosystèmes locaux.

Le contenu du cours se divise en deux parties distinctes. La première partie explore les principes fondamentaux de l'irrigation, en examinant les principales techniques d'irrigation, les éléments fondamentaux de gestion rationnelle de l'irrigation, ainsi que des considérations incontournables telles que la salinité des sols et la tolérance des cultures aux sels. Les étudiants développeront des compétences pratiques par des exemples d'application sur le calcul des doses, fréquence et durées d'irrigation, adaptés aux besoins spécifiques des différentes cultures. La seconde partie se concentre sur le drainage, un élément clé pour préserver la santé des sols et garantir la durabilité des systèmes agricoles à long terme. Les chapitres aborderont les origines et effets des excès d'eau dans un sol agricole sur le sol et les cultures, les méthodes d'assainissement appropriées, ainsi que les principes de drainage, tant souterrain que de surface. Des exemples d'application sont présentés pour permettre aux étudiants d'appliquer leurs connaissances théoriques de manière pratique, en utilisant des outils spécialisés pour évaluer les besoins en eau des cultures et améliorer l'efficacité des systèmes d'irrigation et de drainage.

Avec un volume horaire total de 45 heures, ce cours propose une combinaison harmonieuse de théorie et de pratique, favorisant ainsi une approche intégrée et dynamique de l'apprentissage.

Partie 1 : Irrigation

Chapitre 1 : Les éléments fondamentaux

1.1 Généralités

L'irrigation est une pratique agricole fondamentale qui consiste à fournir de l'eau aux cultures par des moyens artificiels. Essentielle pour garantir une production stable et optimale, elle joue un rôle crucial dans les régions où les précipitations sont insuffisantes ou irrégulières. En régulant l'apport en eau, l'irrigation permet de compenser les déficits hydriques, d'améliorer la qualité des sols et de maximiser la productivité des terres cultivées. Cette régulation est particulièrement importante dans des contextes où l'agriculture doit faire face à des défis croissants, tels que la hausse de la demande alimentaire et les conditions climatiques imprévisibles.

L'irrigation contribue également à la gestion durable des ressources en eau, en permettant une utilisation plus efficace de cette ressource précieuse. En optimisant les rendements agricoles, elle soutient la sécurité alimentaire tout en atténuant les impacts des variations climatiques. De plus, des techniques d'irrigation appropriées peuvent favoriser la conservation de l'eau et réduire les pertes par évaporation, ce qui est particulièrement important dans un contexte de changement climatique. Ces techniques comprennent l'irrigation au goutte-à-goutte et l'irrigation par aspersion, chacune présentant des avantages spécifiques en fonction des cultures et des conditions environnementales.

Ce chapitre explorera en profondeur les différentes méthodes d'irrigation, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les facteurs à considérer lors de leur mise en œuvre. Nous examinerons également les techniques modernes qui améliorent l'efficacité de l'irrigation, ainsi que les pratiques de gestion qui aident à équilibrer les besoins agricoles et la préservation des ressources en eau. En fin de compte, une compréhension approfondie de ces concepts est essentielle pour développer des systèmes d'irrigation durables qui répondent aux défis futurs de l'agriculture.

Définition de l'irrigation

L'irrigation se définit comme le processus d'apport contrôlé d'eau aux terres agricoles, permettant d'assurer un apport hydrique adéquat pour le développement des plantes. Cette méthode est cruciale pour l'agriculture moderne, car elle permet d'améliorer les rendements et de diversifier les cultures.

Importance de l'irrigation

- **Amélioration des rendements agricoles**

L'irrigation augmente significativement les rendements des cultures, notamment dans les zones semi-arides et arides. Les exploitations irriguées peuvent produire jusqu'à trois fois plus que celles qui dépendent uniquement des précipitations naturelles.

- **Gestion durable des ressources en eau**

L'irrigation permet une utilisation plus efficace de l'eau, en réduisant le gaspillage et en favorisant une gestion durable des ressources hydriques.

- **Réduction des risques liés aux sécheresses**

En fournissant un approvisionnement en eau constant, l'irrigation protège les cultures contre les effets néfastes des sécheresses, garantissant ainsi la sécurité alimentaire.

- **Historique et évolution des techniques d'arrosage**

L'irrigation est une pratique ancienne, ayant émergé avec les premières civilisations agricoles. Des systèmes rudimentaires ont évolué vers des techniques modernes, telles que l'irrigation goutte à goutte et par aspersion, qui permettent une distribution précise et efficace de l'eau.

Objectifs de l'irrigation

Les principaux objectifs de l'irrigation incluent :

- **Maximiser la production agricole** : Assurer un approvisionnement hydrique adéquat pour toutes les cultures.
- **Améliorer la qualité des produits** : L'irrigation peut contribuer à produire des fruits et légumes de meilleure qualité.
- **Faciliter la diversification des cultures** : Permettre l'expérimentation de nouvelles cultures nécessitant des niveaux d'humidité spécifiques.
- **Contribuer à la durabilité environnementale** : Une gestion efficace de l'eau contribue à la préservation des écosystèmes locaux.

Rôle et types d'eau

L'eau est le composant principal des plantes, jouant un rôle crucial dans divers processus physiologiques, notamment la photosynthèse. Elle est indispensable à la survie et à la croissance des végétaux, car elle participe à des fonctions essentielles telles que le transport des nutriments, la régulation de la température et la structure cellulaire.

On distingue deux types d'eau au sein des plantes :

a) Eau de constitution

Cette forme d'eau représente une fraction très fine de l'eau absorbée par les plantes, intégrée dans les tissus végétaux. Elle participe à la formation des cellules et des structures internes, contribuant ainsi à la solidité et à la rigidité des plantes. L'eau de constitution est essentielle pour le métabolisme cellulaire, car elle permet le bon fonctionnement des enzymes et des réactions biochimiques.

b) Eau de végétation

L'eau de végétation constitue la majeure partie de l'eau absorbée par les plantes. Après avoir été impliquée dans des processus photosynthétiques et métaboliques, cette eau est évacuée par transpiration à travers les stomates vers l'atmosphère. La quantité d'eau transpirée varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de culture, le stade de développement de la plante et les conditions climatiques environnantes. La gestion de l'eau de végétation est donc essentielle pour assurer une croissance optimale et une récolte productive, tout en tenant compte des défis liés à la disponibilité de l'eau.

Volume d'eau d'irrigation

L'irrigation a toujours été reconnue comme un moteur essentiel de richesse pour les nations, jouant un rôle clé dans le développement économique et la sécurité alimentaire. Dans ce contexte, l'expansion de nouveaux périmètres d'irrigation est devenue une priorité majeure pour de nombreux États à travers le monde. Toutefois, il est crucial de comprendre que chaque projet d'irrigation nécessite une disponibilité suffisante en eau, adaptée aux besoins en débit de pointe de la région concernée. Pour irriguer un hectare, par exemple, il peut être nécessaire de mobiliser jusqu'à 15 000 m³ d'eau par an. Cette exigence souligne l'importance d'une gestion durable et efficace des ressources en eau pour garantir la viabilité des systèmes d'irrigation et soutenir la production agricole.

Qualité de l'eau

Pour garantir une utilisation des eaux d'irrigation sans compromettre la qualité des sols ni la santé humaine, il est impératif que ces eaux respectent des normes de qualité strictes établies par les réglementations nationales et internationales. Ces normes régissent divers aspects de la qualité de l'eau, notamment ses paramètres physiques, chimiques et microbiologiques. Une attention particulière doit être portée à la salinité, aux polluants chimiques et aux agents

pathogènes, car ils peuvent avoir des répercussions graves sur la santé des cultures, des sols et des consommateurs. Par exemple, une salinité excessive peut entraîner une dégradation des sols, rendant les terres agricoles moins productives et plus vulnérables à l'érosion.

En veillant à ce que l'eau d'irrigation respecte ces exigences, nous protégeons non seulement les écosystèmes agricoles, mais aussi la santé des consommateurs et la durabilité des ressources en eau à long terme. Une gestion rigoureuse de la qualité de l'eau contribue à la résilience des systèmes agricoles face aux défis environnementaux et économiques, tout en favorisant une production alimentaire durable et sécurisée. De plus, une surveillance régulière et des analyses de la qualité de l'eau permettent d'anticiper et de corriger les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques.

Il est également essentiel de sensibiliser les agriculteurs et les gestionnaires d'eau à l'importance de ces normes, ainsi que de promouvoir des pratiques agricoles durables qui minimisent l'impact sur la qualité de l'eau. En intégrant des méthodes de traitement et de purification de l'eau dans les systèmes d'irrigation, nous pouvons non seulement améliorer la qualité de l'eau utilisée, mais aussi contribuer à la lutte contre la pollution des ressources hydriques. Par conséquent, une approche holistique de la gestion de l'eau d'irrigation est essentielle pour assurer la santé des écosystèmes, la sécurité alimentaire et la pérennité des ressources en eau pour les générations futures.

Absorption racinaire de l'eau

Les racines sont dotées de structures fines appelées poils radiculaires qui augmentent considérablement la surface d'absorption. Ces poils, présents en grande densité, sont responsables de l'absorption de l'eau et des nutriments dissous dans le sol, jouant un rôle crucial dans la nutrition et la croissance des plantes. La présence de ces poils radiculaires permet aux plantes d'explorer efficacement leur environnement souterrain, maximisant ainsi leur accès aux ressources essentielles.

L'osmose est le processus par lequel l'eau se déplace à travers la membrane semi-perméable des cellules des racines. Lorsque la concentration de solutés (nutriments, sels) à l'intérieur des cellules est inférieure à celle du sol, l'eau s'infiltré dans les racines pour équilibrer les concentrations. Ce mécanisme est vital pour maintenir l'homéostasie cellulaire et garantir que les cellules racinaires restent turgides, ce qui est essentiel pour le soutien structurel de la plante.

La pression racinaire est générée par la force de succion. Lorsque les racines absorbent de l'eau, elles créent une pression négative à l'intérieur des vaisseaux conducteurs, ce qui permet à l'eau de remonter vers les parties supérieures de la plante, comme les tiges et les feuilles. Ce

phénomène est renforcé par des processus tels que la transpiration, où l'eau s'évapore à travers les stomates des feuilles, créant un vide qui aide à tirer l'eau des racines vers le haut.

En outre, l'absorption racinaire est influencée par divers facteurs environnementaux, tels que la température, l'humidité du sol et la présence d'oxygène. Une température trop élevée ou un sol trop sec peut inhiber l'absorption, tandis qu'une humidité adéquate et une aération suffisante favorisent un bon fonctionnement des racines. Ainsi, la santé et l'efficacité du système racinaire sont essentielles pour le développement global de la plante et sa capacité à s'adapter aux variations de son environnement.

Transpiration : La transpiration est un processus essentiel par lequel les plantes perdent de l'eau par évaporation à travers leurs feuilles, principalement via des structures appelées stomates. Ces minuscules pores, situés sur la surface des feuilles, s'ouvrent et se ferment en réponse à divers stimuli environnementaux, permettant ainsi le contrôle de la perte d'eau.

Ce processus joue un rôle crucial dans la régulation de la température interne de la plante. En évaporant l'eau, les plantes peuvent refroidir leur surface, ce qui est particulièrement important lors des journées chaudes et ensoleillées. Cela permet de prévenir le stress thermique et de maintenir des conditions optimales pour la photosynthèse.

En outre, la transpiration crée un gradient de pression qui favorise un flux d'eau continu depuis les racines vers les feuilles. Lorsque l'eau s'évapore des stomates, elle génère une pression négative dans les vaisseaux conducteurs, appelés xylème. Ce phénomène, souvent décrit comme un "effet de succion", permet à l'eau et aux nutriments dissous d'être tirés efficacement des racines vers les parties supérieures de la plante.

Adaptations au stockage et à l'utilisation de l'eau: Certaines plantes, en particulier celles adaptées aux environnements arides, développent des structures spécialisées pour stocker de l'eau et la libérer progressivement, leur permettant de survivre dans des conditions de sécheresse prolongée. Ces adaptations incluent des tissus spongieux ou des organes de réserve, comme les tubercules et les racines épaisses, qui peuvent accumuler l'eau pendant les périodes humides. Parallèlement, les plantes ont la capacité d'ajuster leur comportement face aux variations environnementales. Par exemple, en réponse à des conditions de sécheresse, elles peuvent fermer leurs stomates pour réduire la perte d'eau par évaporation, tandis qu'en cas d'humidité excessive, elles peuvent moduler l'ouverture des stomates pour éviter l'accumulation d'eau dans les feuilles. Ces mécanismes de régulation, couplés à des stratégies de stockage, permettent aux plantes de maximiser leur efficacité hydrique et de s'adapter aux fluctuations climatiques, assurant ainsi leur survie et leur croissance dans des habitats souvent hostiles.

1.2 Techniques d'arrosage

L'arrosage est une pratique essentielle en agriculture, garantissant la croissance des cultures, surtout dans les régions à précipitations limitées. Plusieurs méthodes d'irrigation ont été développées pour répondre aux besoins des plantes tout en tenant compte des contraintes environnementales et économiques. Ce chapitre présente brièvement trois grandes catégories de techniques d'irrigation :

1. Irrigation gravitaire ou de surface : Cette technique utilise la gravité pour acheminer l'eau vers les cultures. Elle comprend l'irrigation par ruissellement, par sillons et par submersion. Chacune de ces techniques a ses spécificités et nécessite des aménagements de terrain adaptés, permettant ainsi une gestion efficace de l'eau dans divers types de sols.

2. Irrigation par aspersion : Cette technique simule la pluie, est une technique efficace et polyvalente qui projette de l'eau sur les cultures sous forme de gouttelettes. Cette méthode est particulièrement appréciée pour sa capacité à couvrir de grandes surfaces de manière uniforme, ce qui est essentiel pour assurer une distribution équilibrée de l'eau. Elle comprend plusieurs systèmes, tels que les asperseurs classiques, les pivots, les enrouleurs et les canaux d'aspersion. Les **asperseurs classiques** sont souvent utilisés dans les champs en raison de leur simplicité et de leur efficacité. Ils peuvent être ajustés pour projeter de l'eau à différentes hauteurs et angles, s'adaptant ainsi à diverses cultures et conditions de terrain. Les systèmes **de pivot**, quant à eux, permettent une irrigation circulaire, maximisant la couverture tout en minimisant les déplacements nécessaires. Cette technique est particulièrement utile pour les grandes exploitations, où la gestion du temps et des ressources est cruciale. Les **enrouleurs**, qui utilisent des tuyaux flexibles pour distribuer l'eau, offrent également une grande flexibilité. Ils peuvent être déplacés pour irriguer différentes sections du champ, ce qui permet une gestion efficace de l'eau et réduit les zones non irriguées. Les **canaux d'aspersion** sont une option supplémentaire, permettant une irrigation contrôlée sur des surfaces variées, tout en réduisant le risque d'érosion des sols. En plus de leur efficacité, les systèmes d'irrigation par aspersion peuvent être automatisés, facilitant ainsi la gestion de l'eau et permettant une irrigation précise en fonction des besoins des cultures et des conditions climatiques.

Irrigation localisée ou micro-irrigation : L'irrigation localisée, également connue sous le nom de micro-irrigation, est une technique moderne qui cible directement les racines des plantes, notamment par le biais de systèmes d'irrigation goutte à goutte. Cette technique permet une utilisation optimale de l'eau en fournissant des quantités précises et contrôlées d'eau. En

réduisant le gaspillage d'eau et les pertes par évaporation, l'irrigation localisée constitue une solution particulièrement efficace pour les régions à ressources hydriques limitées. L'irrigation goutte à goutte, qui fait partie de la micro-irrigation, utilise des tuyaux perforés ou des émetteurs pour diffuser l'eau lentement et directement au niveau du sol, ce qui optimise l'absorption par les racines. Cette méthode est particulièrement adaptée pour les cultures sensibles, telles que les légumes et les fruits, qui nécessitent des soins particuliers en matière d'humidité.

Les méthodes de fonctionnement et d'utilisation pratique de chaque technique seront détaillées dans **le chapitre 2, intitulé "Distribution à la parcelle"**, où nous explorerons les spécificités de la micro-irrigation et son intégration dans les systèmes d'exploitation agricoles.

1.3. Réseaux d'irrigation

Introduction

Les réseaux d'irrigation englobent l'ensemble des infrastructures et des systèmes conçus pour transporter et distribuer l'eau aux cultures. Ces réseaux jouent un rôle essentiel dans la gestion des ressources en eau, notamment dans les régions où les précipitations sont insuffisantes ou irrégulières. Ils permettent d'optimiser l'utilisation de l'eau, d'améliorer les rendements agricoles et de garantir un approvisionnement constant en eau, même dans des conditions climatiques défavorables.

En intégrant les différentes composantes, les réseaux d'irrigation assurent la distribution de l'eau les différentes unités parcellaires. Cela permet non seulement de soutenir la croissance des cultures, mais aussi de minimiser les pertes d'eau par évaporation ou drainage excessif. De plus, une gestion adéquate des réseaux d'irrigation contribue à la durabilité des ressources en eau, en favorisant une irrigation précise et adaptée aux besoins spécifiques des plantes.

L'importance de ces réseaux se manifeste également dans leur capacité à répondre aux défis liés aux changements climatiques, en offrant des solutions flexibles pour s'adapter aux variations des régimes de précipitations. En fin de compte, des réseaux d'irrigation bien conçus et entretenus sont essentiels pour garantir la sécurité alimentaire et la durabilité des systèmes agricoles.

1.3.1 Composantes des réseaux d'irrigation

Les réseaux d'irrigation comprennent divers éléments essentiels au transport et à la distribution de l'eau aux cultures, tels que les canaux, les réservoirs, les systèmes de pompage, les tuyaux et les vannes.

A. Canaux et rivières

Les canaux et les rivières, qu'ils soient naturels ou artificiels, sont conçus pour acheminer l'eau depuis des sources telles que des lacs ou des aquifères vers les zones agricoles. La conception de ces infrastructures doit prendre en compte plusieurs facteurs :

- **Topographie:** La pente du terrain influence le flux d'eau et doit être soigneusement évaluée pour optimiser l'acheminement.
- **Capacité d'écoulement:** Les canaux doivent être dimensionnés pour gérer efficacement le volume d'eau requis, tout en évitant les débordements et l'érosion.
- **Écologie :** La préservation des habitats naturels et des écosystèmes environnants est primordiale pour maintenir la biodiversité, qui soutient l'équilibre des écosystèmes.

B. Réservoirs et bassins

Les réservoirs et bassins jouent un rôle central dans la gestion de l'eau, permettant de stocker l'eau pendant les périodes de pluie ou de crue pour assurer un approvisionnement constant durant les sécheresses. Ils sont également essentiels pour stocker les eaux souterraines après leur pompage à partir de puits ou de forages, offrant ainsi une ressource supplémentaire en période de besoin. Cela est particulièrement important dans les régions soumises à des variations climatiques.

Ces infrastructures régulent le débit d'eau dans le système d'irrigation, garantissant une distribution adaptée aux besoins des cultures et contribuant à prévenir les inondations ou les pénuries d'eau. De plus, les réservoirs peuvent améliorer la qualité de l'eau en permettant la décantation des particules solides et la réduction des polluants avant la distribution aux champs. Exposés au soleil, ils réchauffent également les eaux souterraines froides, favorisant ainsi l'absorption des nutriments par les racines et soutenant la croissance des cultures. En maintenant une température optimale, ils stimulent l'activité microbienne dans le sol, facilitant la décomposition des matières organiques et la libération de nutriments essentiels.

C. Stations de Pompage

Les stations de pompage sont des installations stratégiques qui garantissent l'acheminement de l'eau vers des zones où la gravité ne suffit pas. Elles assurent un approvisionnement fiable et efficace pour les cultures. L'emplacement de ces stations est crucial ; elles doivent être situées à proximité des sources d'eau pour faciliter l'accès et l'acheminement.

Pour fonctionner correctement, ces stations s'appuient sur des pompes, essentielles pour refouler l'eau, en particulier dans les zones en pente ou éloignées des sources. Le choix de la

pompe dépend de la hauteur manométrique et du débit requis pour répondre aux besoins des cultures, permettant ainsi une irrigation adaptée et efficace.

D. Tuyaux

Les tuyaux constituent une composante fondamentale des réseaux d'irrigation, jouant un rôle clé dans le transport de l'eau depuis les sources jusqu'aux zones cultivées. Fabriqués à partir de matériaux variés tels que le PVC, le polyéthylène ou le métal, le choix du matériau influence la durabilité, la résistance à la corrosion et le coût. La dimension des tuyaux doit être adaptée au volume d'eau à transporter pour garantir un débit suffisant tout en minimisant les pertes de pression. Une installation correcte est cruciale pour éviter les fuites et optimiser l'efficacité du système, ce qui inclut le choix d'un tracé adéquat et l'utilisation de joints étanches.

E. Vannes

Les vannes sont des éléments indispensables des systèmes d'irrigation, jouant un rôle fondamental dans le contrôle et la régulation du débit d'eau. Elles permettent non seulement d'ajuster le flux pour chaque zone d'irrigation, mais également de répartir l'eau depuis la conduite principale vers les différentes parcelles à irriguer. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour les cultures ayant des besoins en eau variés, garantissant ainsi que chaque plante reçoit la quantité nécessaire pour son développement optimal. . Les vannes jouent également un rôle clé dans l'ajustement de la pression de l'eau dans les conduites, en fonction des exigences de la technique d'irrigation utilisée.

En assurant une distribution uniforme, les vannes contribuent à maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau, ce qui est essentiel pour préserver cette ressource précieuse. De plus, elles permettent de stopper le passage de l'eau une fois l'irrigation terminée, évitant ainsi le gaspillage et les inondations potentielles.

Types de vannes :

- **Vannes manuelles** : Permettent un contrôle direct par l'utilisateur pour ouvrir ou fermer le passage de l'eau. Elles sont simples à utiliser mais nécessitent une intervention physique.
- **Vannes automatiques** : Contrôlées par des systèmes de commande automatique, elles ajustent le débit en fonction des données des capteurs ou des programmations préétablies.

F / Systèmes de contrôle

Les capteurs d'humidité du sol sont des outils essentiels intégrés dans les systèmes de contrôle modernes pour la gestion de l'irrigation. En sélectionnant le type de capteur le plus adapté et en intégrant ces technologies dans leurs systèmes d'irrigation, les agriculteurs peuvent non seulement améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau, mais aussi optimiser la santé des cultures et contribuer à une agriculture durable.

L'utilisation de capteurs d'humidité du sol présente plusieurs avantages significatifs:

- **Optimisation de l'irrigation** : Ces capteurs fournissent des données précises sur l'humidité du sol, permettant ainsi d'ajuster les horaires d'irrigation en fonction des besoins réels des plantes. Cela aide à éviter le gaspillage d'eau et à garantir que chaque goutte est utilisée de manière efficace.
- **Amélioration de la santé des plantes** : Un contrôle précis de l'humidité permet de prévenir le stress hydrique, qui peut nuire au développement des cultures. En maintenant des niveaux d'humidité adéquats, les capteurs favorisent une croissance saine et robuste des plantes, augmentant ainsi les rendements.
- **Gestion durable des ressources** : L'utilisation efficace de l'eau contribue à la durabilité des pratiques agricoles, en particulier dans les régions sujettes à la sécheresse. En réduisant la consommation d'eau, les agriculteurs peuvent protéger les ressources en eau locales et soutenir la biodiversité.
- **Réduction des coûts** : En optimisant les horaires et les quantités d'irrigation, les capteurs d'humidité permettent également de réduire les coûts liés à l'eau et à l'énergie, rendant l'agriculture plus rentable.
- **Prise de décision**: Les données collectées par les capteurs d'humidité offrent des informations précieuses pour la prise de décisions agronomiques. Cela permet aux agriculteurs de planifier leurs activités en se basant sur des données fiables, augmentant ainsi la productivité et réduisant les risques liés aux conditions climatiques. Actuellement, ces informations peuvent être traitées à distance et utilisées par des systèmes d'irrigation automatisés. Ces systèmes peuvent enclencher et arrêter l'irrigation de manière autonome, éliminant ainsi les efforts traditionnels requis de la part des

agriculteurs. Cette automatisation permet non seulement de gagner du temps, mais aussi d'optimiser l'utilisation de l'eau en répondant instantanément aux besoins des cultures.

1.3.2 Entretien des réseaux d'irrigation

L'entretien des réseaux d'irrigation est indispensable pour garantir leur efficacité et leur durabilité. Des interventions régulières permettent de prévenir les problèmes et d'assurer un fonctionnement optimal. Parmi les méthodes et moyens couramment utilisés, on retrouve:

1. Inspection régulière

- **Visuelle** : Effectuez des vérifications fréquentes de l'état des canaux, des tuyaux et des vannes afin de détecter d'éventuelles fuites ou obstructions.
- **Surveillance des performances** : Mesurez le débit d'eau et comparez-le aux normes établies pour identifier tout problème potentiel.

2. Nettoyage

- **Débouchage** : Utilisez des outils manuels ou mécaniques pour enlever les débris, les sédiments et les plantes aquatiques qui peuvent obstruer les canaux.
- **Désinfection** : Appliquez des solutions adaptées pour éliminer les algues et autres micro-organismes nuisibles, préservant ainsi la qualité de l'eau.

3. Réparations

- **Réparation de fuites** : Remplacez ou réparez les sections de tuyaux endommagées pour éviter les pertes d'eau.
- **Renforcement des structures** : Assurez-vous que les berges et les canaux sont en bon état, en réparant ou en renforçant les zones affaissées pour prévenir l'érosion.

4. Gestion de l'eau

- **Surveillance des niveaux d'eau** : Installez des capteurs pour contrôler les niveaux d'eau et ajuster les débits en conséquence, garantissant une irrigation efficace.
- **Régulation des Débits** : Ajustez les vannes et les orifices pour optimiser la distribution de l'eau en fonction des besoins des cultures.

5. Formation et sensibilisation

- **Formation des opérateurs** : Offrez des sessions de formation sur l'entretien des réseaux d'irrigation et la gestion de l'eau, assurant ainsi que le personnel est qualifié.
- **Sensibilisation des agriculteurs** : Informez les utilisateurs sur l'importance de maintenir les infrastructures d'irrigation et les bonnes pratiques à adopter.

6. Utilisation de technologies

- **Systèmes de gestion d'irrigation** : Intégrez des technologies de contrôle automatisé pour surveiller et gérer l'irrigation de manière efficace.
- **Drones et capteurs** : Utilisez des drones pour inspecter les infrastructures et des capteurs pour suivre l'humidité du sol, améliorant ainsi la précision des interventions.

7. Planification et maintenance préventive

- **Élaboration d'un calendrier d'entretien** : Planifiez des entretiens réguliers pour éviter les pannes et prolonger la durée de vie des installations.
- **Budget** : Allouez des ressources financières pour les réparations et les mises à niveau nécessaires, garantissant ainsi la pérennité du système d'irrigation.

1.4 Paramètres de dimensionnement d'un réseau d'irrigation

Le dimensionnement d'un réseau d'irrigation est un processus complexe qui nécessite de prendre en compte plusieurs paramètres clés afin d'assurer une distribution efficace et durable de l'eau. Les principaux paramètres à considérer sont:

1. Besoins en eau des cultures

Les besoins en eau des cultures sont essentiels pour déterminer la quantité d'eau à fournir. Ces besoins sont généralement exprimés en millimètres par jour (mm/jour) ou en mètres cubes par hectare (m³/ha). Ils varient selon le type de culture, le stade de développement et les conditions climatiques. Par exemple, les jeunes plants nécessitent moins d'eau que les cultures matures. De plus, les besoins en eau fluctuent au cours de l'année en raison de la saisonnalité, ce qui implique une planification minutieuse pour ajuster les horaires et les quantités d'irrigation en fonction des périodes de forte demande, comme pendant les mois chauds ou lors de la floraison.

2. Topographie du terrain

La topographie du terrain joue un rôle primordial dans le dimensionnement d'un réseau d'irrigation. Les pentes influencent le ruissellement et la répartition de l'eau. Sur des terrains en pente, des systèmes comme le goutte-à-goutte peuvent être plus appropriés pour éviter l'érosion et assurer une distribution uniforme. En revanche, sur des surfaces planes, il est essentiel d'intégrer des systèmes de drainage pour prévenir l'accumulation excessive d'eau. Le dimensionnement et l'installation du réseau doivent également tenir compte du sens des courbes de niveaux, afin de garantir que l'eau s'écoule correctement et atteigne toutes les zones de culture de manière uniforme. De plus, la configuration du terrain peut nécessiter l'aménagement de canaux ou de bassins, particulièrement dans les zones vallonnées, et l'accès aux zones de culture doit être soigneusement planifié pour faciliter l'entretien et l'exploitation des équipements d'irrigation.

3. Types de systèmes d'irrigation

Le choix du système d'irrigation est fondamental pour le dimensionnement du réseau, car il influence directement les besoins en eau, la distribution et la couverture des cultures. Chaque système, qu'il s'agisse de goutte-à-goutte, d'aspersion ou de sub-irrigation, a des exigences spécifiques en termes de pression et de débit. Par exemple, le système d'aspersion nécessite une pression plus élevée pour projeter l'eau dans l'air, tandis que le goutte-à-goutte fonctionne à des pressions plus basses pour délivrer l'eau directement au sol. Cette diversité impose une sélection rigoureuse des équipements, tels que les pompes, les tuyaux et les vannes, afin d'assurer une efficacité optimale.

4. Infrastructure du réseau

Les infrastructures du réseau d'irrigation, notamment les canalisations, les réservoirs et les pompes, sont cruciales pour garantir le bon fonctionnement du système. Le dimensionnement des canalisations doit permettre le transport du volume d'eau nécessaire tout en maintenant une pression adéquate pour éviter les fuites et assurer une distribution uniforme. Les matériaux utilisés pour la construction des infrastructures doivent être choisis en fonction de leur durabilité, de leur résistance à la corrosion et de leurs coûts d'installation et d'entretien. Par ailleurs, un bon dimensionnement doit anticiper les évolutions futures des pratiques agricoles, permettant ainsi d'adapter le réseau aux nouvelles exigences.

5. Analyse économique et environnementale

En plus des considérations techniques, une analyse économique est essentielle lors du dimensionnement d'un réseau d'irrigation. Cela inclut l'évaluation des coûts d'installation, d'exploitation et de maintenance, ainsi que le retour sur investissement potentiel. Parallèlement, une évaluation de l'impact environnemental est nécessaire pour s'assurer que le réseau d'irrigation n'affecte pas négativement les ressources en eau locales et la biodiversité. Cela peut impliquer des études sur la qualité de l'eau, la préservation des sols et la gestion des ressources en eau à long terme.

1.5 Problèmes de salinité et tolérances des cultures aux sels

1.5.1 Problèmes de salinité

La salinité des sols et des eaux d'irrigation constitue un défi majeur en agriculture, ayant des conséquences significatives sur la croissance des cultures. Les principaux problèmes liés à la salinité sont synthétisés comme suit :

1. Accumulation de sels

La salinité provient de l'accumulation de sels solubles, notamment le sodium, le calcium, le magnésium et le chlore, dans le sol. Cette accumulation peut être causée par des facteurs naturels, tels que l'altération des roches sous l'effet des conditions climatiques, ou par des pratiques agricoles inadéquates, comme une irrigation excessive avec de l'eau de mauvaise qualité.

2. Toxicité

Des concentrations élevées de sels peuvent être nuisibles aux plantes en perturbant leur métabolisme. Par exemple, le sodium peut interférer avec l'absorption de cations essentiels comme le potassium, compromettant ainsi la nutrition des plantes. La toxicité d'un sel est liée à sa solubilité, c'est-à-dire un sel plus soluble est donc plus toxique.

3. Stress hydrique

La salinité accroît la pression osmotique du sol, rendant l'absorption d'eau par les racines plus difficile. L'eau se déplace naturellement des milieux moins concentrés vers ceux plus concentrés, entraînant un stress hydrique, même en présence d'eau disponible. Ce phénomène, souvent appelé sécheresse physiologique, provoque flétrissement et réduction de la croissance des plantes.

4. Impact sur la structure du sol

Des niveaux élevés de sels sodiques peuvent dégrader la structure du sol, entraînant compaction et diminution de la porosité. Cela affecte le drainage et l'aération du sol, nuisant à la santé des racines. De plus, une mauvaise aération limite l'activité microbologique, ce qui peut avoir des effets négatifs sur la fertilité et la santé globale du sol.

1.5.2 Tolérances des cultures aux sels

La salinité des sols est un problème complexe qui impacte la santé des cultures et la productivité agricole. Comprendre les tolérances variées des cultures aux sels et adopter des pratiques de gestion appropriées sont essentiels pour atténuer les effets négatifs de la salinité et garantir une agriculture durable. Il est également conseillé de rechercher des variétés de cultures tolérantes à la salinité pour mieux faire face à ce défi.

1. Variabilité entre les cultures

Les différentes cultures présentent des niveaux de tolérance variés à la salinité. Certaines espèces, comme les halophytes, prospèrent dans des environnements salins, tandis que d'autres, telles que le maïs et le blé, sont beaucoup plus sensibles. Les plantes tolérantes au sel adoptent plusieurs stratégies pour gérer la salinité :

- **Exclusion** : Certaines plantes empêchent l'absorption des sels par leurs racines, limitant ainsi leur entrée dans le système végétal.
- **Dilution** : D'autres accumulent des sels dans leurs vacuoles, réduisant leur toxicité et permettant ainsi un meilleur fonctionnement.
- **Adaptation** : Les halophytes accumulent des sels dans des tissus spécialisés, protégeant ainsi les parties vitales comme les feuilles et les tiges. Elles possèdent également des adaptations morphologiques et physiologiques pour excréter les sels excédentaires.

2. Sélection de cultures

Dans les régions où la salinité est élevée, il est essentiel de sélectionner des variétés de cultures adaptées aux conditions salines. Il est recommandé d'éviter les espèces sensibles au stress salin, telles que le riz, les haricots, les carottes, les petits pois, les agrumes, les oliviers et les vignes. À la place, il est préférable de favoriser des cultures plus tolérantes, comme la betterave sucrière et certaines céréales. Cette approche permet non seulement de maintenir la productivité agricole, mais aussi de protéger les ressources en eau et d'améliorer la résilience des systèmes agricoles face aux défis posés par la salinité.

3. Gestion agronomique

Pour atténuer les effets de la salinité sur les cultures, plusieurs pratiques de gestion agronomique peuvent être mises en œuvre :

1. Drainage adéquat

Un bon drainage est crucial pour réduire l'accumulation de sels dans le sol. En évacuant l'excès d'eau, cette pratique permet de diminuer la concentration saline, facilitant ainsi l'absorption d'eau par les racines des plantes. Un système de drainage efficace aide également à prévenir l'engorgement du sol, qui peut aggraver les problèmes de salinité.

2. Utilisation de cultures de couverture

L'implantation de cultures de couverture, comme le trèfle et la luzerne, contribue à améliorer la santé du sol. Ces plantes protègent le sol de l'érosion, favorisent la biodiversité et accroissent l'activité microbologique. De plus, elles aident à réduire l'évaporation de l'eau et à améliorer la structure du sol, ce qui peut atténuer les effets néfastes de la salinité.

3. Application de matières organiques

L'ajout de matières organiques, telles que le compost ou le fumier, est une méthode efficace pour améliorer la structure du sol. Ces amendements augmentent la capacité de rétention d'eau du sol et favorisent l'activité biologique, ce qui peut réduire la salinité et améliorer la disponibilité des nutriments pour les plantes. Une meilleure structure du sol favorise également le drainage et l'aération.

4. Irrigation avec de l'eau moins salée

L'utilisation d'eau d'irrigation de meilleure qualité, c'est-à-dire moins saline, est essentielle pour minimiser l'impact de la salinité. Il est conseillé de surveiller la salinité de l'eau d'irrigation et d'opter pour des sources d'eau à faible teneur en sels. De plus, des techniques d'irrigation efficaces, comme l'irrigation goutte à goutte, permettent de réduire le gaspillage d'eau et de limiter l'accumulation de sels à la surface du sol.

Ces pratiques de gestion agronomique, lorsqu'elles sont combinées, peuvent contribuer à créer un environnement plus favorable pour les cultures, réduisant ainsi les effets néfastes de la salinité et améliorant la durabilité des systèmes agricoles.

Chapitre 2 : Distribution à la parcelle

2.1 Généralités

La distribution de l'eau à la parcelle est un élément fondamental pour assurer une gestion efficace des ressources en eau en agriculture. Ce chapitre aborde les principes et les techniques de distribution de l'eau, en se concentrant sur les divers systèmes d'irrigation et leur impact sur la croissance des cultures.

Une bonne gestion de l'eau permet non seulement d'optimiser les rendements, mais aussi de préserver les ressources hydriques et d'assurer une agriculture durable. La compréhension des mécanismes de rétention d'eau par le sol, ainsi que des besoins en eau des cultures, est essentielle pour déterminer les méthodes d'irrigation les plus appropriées.

Nous examinerons également les différents techniques d'irrigation, tels que l'irrigation gravitaire, l'irrigation par aspersion et la micro-irrigation, en analysant leurs principes, avantages et inconvénients. En outre, des notions essentielles telles que les réserves en eau du sol, les doses et fréquences d'irrigation, ainsi que les déficits en eau seront abordées.

L'objectif de ce chapitre est de fournir des informations académiques détaillées sur les pratiques de distribution de l'eau. Cela permettra aux agriculteurs d'optimiser l'efficacité de l'utilisation de l'eau et de garantir la durabilité de leurs systèmes agricoles.

2.2 Rétention de l'eau par le sol

2.2.1 Forces de rétention

La rétention de l'eau dans le sol est régie par des interactions complexes influencées par plusieurs facteurs, tels que la position des molécules d'eau, leur proximité avec les particules solides du sol et les caractéristiques des pores. Ces forces de rétention peuvent être classées en quatre catégories principales :

a) Forces d'adsorption (f_a)

Ces forces, essentielles à la dynamique des interactions entre l'eau et le sol, se manifestent de manière significative entre les molécules d'eau et les surfaces solides des particules du sol. Elles résultent de l'attraction électrostatique entre les charges polaires des molécules d'eau, qui possèdent une distribution inégale des charges, et les surfaces hydrophiles des particules, telles que celles des argiles et des minéraux. Cette interaction crée un phénomène appelé adsorption, entraînant une accumulation d'eau en couche mince à la surface des particules. Ce phénomène joue un rôle crucial dans les processus d'infiltration et de rétention d'eau, influençant ainsi la

disponibilité en eau pour les plantes et les microorganismes du sol, ainsi que la dynamique des nutriments.

b) Forces de capillarité (fc)

Les forces de capillarité se manifestent à l'interface entre les molécules d'eau et l'air, jouant un rôle fondamental dans le cycle de l'eau au sein des écosystèmes terrestres. Ces forces, résultant de l'interaction entre la tension superficielle de l'eau et les surfaces des pores du sol, sont essentielles pour le mouvement de l'eau à travers les espaces interstitiels du sol. Leur efficacité dépend du potentiel capillaire, qui est influencé non seulement par la tension superficielle, mais aussi par la taille et la forme des pores, ainsi que par la nature des matériaux présents dans le sol.

Lorsque la taille des pores est réduite, par exemple dans les sols argileux, les forces de capillarité deviennent plus prononcées, permettant à l'eau de remonter contre la gravité. Ce mécanisme favorise le transport de l'eau depuis les couches plus profondes du sol vers les racines des plantes, assurant ainsi leur approvisionnement en eau et en nutriments essentiels. De plus, ces forces jouent un rôle clé dans la régulation de l'humidité du sol, influençant à la fois l'irrigation naturelle et les pratiques agricoles.

La loi de Jurin, qui décrit la hauteur de la remontée capillaire, est donnée par la formule :

$$\mathbf{h} = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{\rho g r} \quad 1$$

où :

h : Hauteur de la colonne d'eau,

γ (gamma): Tension superficielle de l'eau,

θ (theta) : Angle de contact (ou raccordement) entre l'eau et la surface du pore,

ρ (rho): Masse volumique de l'eau,

g : Accélération due à la gravité,

r : Rayon du pore

Cette loi montre que la hauteur de la remontée capillaire est inversement proportionnelle au rayon des pores : plus les pores sont fins, plus l'eau peut remonter haut. Ainsi, lorsque la taille des pores est réduite, comme dans les sols argileux, les forces de capillarité deviennent plus prononcées, permettant à l'eau de remonter contre la gravité.

c) Forces hydrostatiques (fh)

Les forces hydrostatiques résultent de l'interaction entre les molécules d'eau au sein du sol, provoquées par le poids de la colonne d'eau qui s'exerce sur elles. Ces forces sont principalement déterminées par la pression exercée par les molécules d'eau à un certain niveau de profondeur, influençant ainsi la dynamique de l'eau dans le sol.

Dans ce contexte, les forces hydrostatiques favorisent la cohésion entre les molécules d'eau, ce qui contribue à la formation d'une colonne d'eau stable. Cette cohésion est essentielle pour maintenir l'intégrité des réserves d'eau dans le sol et permet à l'eau de se déplacer efficacement à travers les pores du sol. De plus, la pression hydrostatique générée par le poids de l'eau influence la capacité du sol à retenir l'humidité, ce qui est crucial pour la disponibilité de l'eau pour les plantes et les microorganismes. La résultante de ces forces (F), qui représente le potentiel total agissant sur l'eau dans le sol, peut être exprimée algébriquement. Cette équation prend en compte la direction de chaque force, comme suit :

d) Forces de pesanteur (fp)

Les forces de pesanteur, également connues sous le nom de forces gravitationnelles, agissent sur tous les corps en raison de l'attraction exercée par la gravité terrestre. Ces forces sont directement liées au poids des molécules d'eau, ce qui signifie qu'elles influencent de manière significative la dynamique de l'eau dans le profil du sol. En effet, la pesanteur joue un rôle crucial dans le mouvement de l'eau, favorisant à la fois l'infiltration et le drainage.

Lorsque l'eau s'accumule dans le sol, la force de pesanteur agit pour faire descendre cette eau vers des couches plus profondes, facilitant ainsi l'infiltration dans les horizons du sol. Ce processus est essentiel pour reconstituer les aquifères souterrains et pour assurer une distribution uniforme de l'humidité dans le sol. Parallèlement, les forces de pesanteur contribuent aussi au drainage, permettant à l'excès d'eau de s'écouler vers des zones de moindre pression ou vers des points de collecte, tels que les rivières et les lacs.

Cette formulation permet d'évaluer la dynamique de l'eau dans le sol et son interaction avec les plantes, essentielle pour comprendre les mécanismes d'absorption et de régulation hydrique. Cette régulation hydrique fait référence aux mécanismes et processus par lesquels les organismes, en particulier les plantes, maintiennent un équilibre en matière d'eau dans leurs systèmes. Cela inclut

La résultante de ces forces (F), qui représente le potentiel total agissant sur l'eau dans le sol, peut être exprimée algébriquement par l'équation suivante :

$$F = f_a - f_c + f_p + f_p$$

2

Où

fa: Forces d'adsorption (fa)

fc: Forces de capillarité (fc)

fh: Forces hydrostatiques (fh)

fp: Force de pesanteur (fp)

2.2.2 Humidité du sol

Définition

L'humidité du sol désigne la quantité d'eau contenue dans le sol, un facteur essentiel qui influence ses propriétés physiques et chimiques, ainsi que son comportement en matière de rétention d'eau et de disponibilité pour les plantes. L'humidité du sol est vital pour la croissance des cultures, car elle affecte non seulement l'accès à l'eau, mais également la dynamique des nutriments et l'activité biologique du sol.

L'humidité du sol se présente sous deux formes principales :

1. Humidité pondérale du sol

L'humidité pondérale (ou massique) du sol, notée Hp ou Hm, est définie comme la quantité d'eau présente dans le sol par rapport à la masse de sol sec. Elle est exprimée en pourcentage, représentant le poids d'eau par rapport au poids de sol. Cette mesure permet de comparer la capacité de rétention d'eau entre différents types de sols et est essentielle pour évaluer la disponibilité en eau pour les plantes. Elle est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\mathbf{Hp (\%)} = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad 3$$

où

m_w = masse de l'eau dans le sol (en grammes ou kilogrammes)

m_s = masse du sol sec (en grammes ou kilogrammes)

2. Humidité volumétrique du sol

L'humidité volumétrique du sol, notée Hv, correspond au volume d'eau présent dans le sol par rapport au volume total de celui-ci. Exprimée en pourcentage, elle permet d'évaluer la capacité de rétention d'eau d'un sol. Cet indicateur est essentiel pour déterminer la quantité d'eau

disponible pour les plantes. Une humidité adéquate assure que les racines peuvent absorber facilement l'eau nécessaire à leur croissance et à leur développement.

1. Relation entre humidité pondérale et volumétrique

L'humidité volumétrique (H_v) est le produit de l'humidité pondérale (H_p) et la densité apparente (D_a) du sol et s'écrit comme suit :

$$H_v = H_p \times D_a \quad 4$$

où

Humidité volumétrique (H_v) s'exprime en cm^3 d'eau / cm^3 de sol

Densité apparente (D_a) s'exprime en g/cm^3

2.2.3 Niveaux d'humidités critiques du sol

Les niveaux d'humidité critiques du sol en relation avec l'absorption de l'eau par les plantes sont :

1. Humidité à capacité au champ (H_{cc})

L'humidité à capacité au champ est le niveau d'humidité du sol atteint après une pluie ou une irrigation abondante, lorsque l'excès d'eau s'est drainé et que le sol est saturé mais sans eau libre. À ce stade, le sol contient une quantité optimale d'eau, permettant aux plantes d'absorber la fraction de l'eau facilement utilisable et de manière efficace.

2. Humidité au point de flétrissement temporaire (H_{ft})

L'humidité au point de flétrissement temporaire (H_{ft}) correspond au niveau d'humidité du sol à partir duquel les plantes commencent à manifester des signes de stress hydrique. À ce stade, une partie de l'eau disponible dans le sol a été utilisée, mais les plantes peuvent encore se rétablir si de l'eau est réintroduite rapidement.

3. Point de flétrissement permanent (H_{fp})

Le point de flétrissement permanent (H_{fp}) désigne le niveau d'humidité du sol en dessous duquel les plantes ne peuvent plus extraire suffisamment d'eau pour soutenir leurs fonctions vitales. À ce stade critique, les plantes commencent à subir un flétrissement irréversible, ce qui

peut entraîner leur mort. Cela se produit lorsque le sol est trop sec pour permettre l'absorption d'eau par les racines des plantes.

À ce niveau, les forces d'adsorption de l'eau par le sol surpassent les forces d'absorption de l'eau par les plantes. Les molécules d'eau sont fortement retenues par les particules du sol, rendant leur accès impossible pour les racines. Cette situation accentue le stress hydrique et compromet gravement la vie des plantes.

2.2.4 Courbe de rétention de l'eau par le sol

Définition

La courbe de rétention de l'eau par le sol, communément appelée courbe pF, représente la relation entre l'humidité du sol et la tension ou le potentiel matriciel de l'eau dans le sol. Cette courbe est un outil essentiel pour comprendre comment l'eau est retenue et disponible pour les plantes.

Elle est généralement tracée avec l'humidité volumétrique (ou gravimétrique) sur l'axe des abscisses et le logarithme de la tension matricielle (pF) sur l'axe des ordonnées (Fig1) Le pF, qui est une mesure de la tension d'adhésion de l'eau aux particules du sol, est défini comme suit :

$$\mathbf{pF} = - \log_{10}(F) \qquad 5$$

où

F est la tension matricielle en centimètres d'eau

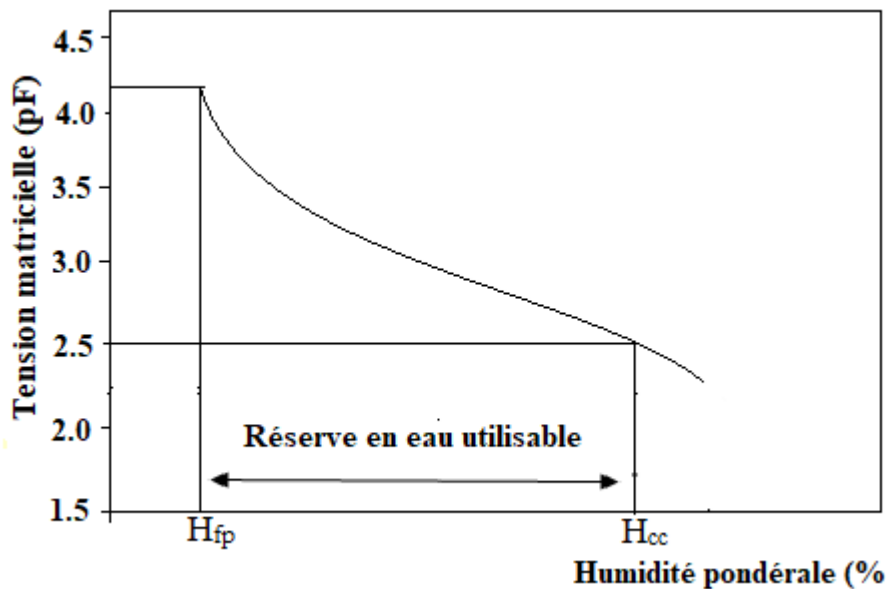


Fig 1a: Courbe de rétention de l'eau par le sol (pF)

2. Interprétation de la courbe

La teneur en eau d'un sol à capacité au champ (H_{cc}) est comparable à celle mesurée en laboratoire, correspondant à une valeur de pF de 2,5. En revanche, l'humidité au point de flétrissement permanent (H_{fp}) est liée à une valeur de pF de 4,2. À un pF de 3,7, le sol atteint son humidité critique, également appelée point de flétrissement temporaire ou point de danger.

Le pF représente le logarithme décimal de la force de succion du sol, exprimée en centimètres de pression. Ainsi, une valeur de pF de 4,2 indique la force maximale de succion que les plantes peuvent supporter, équivalente à environ 15 à 16 bars.

La figure 1b illustre l'influence de la texture du sol sur la relation entre la tension de succion (en hPa) et la teneur en eau. Dans le sable, la courbe est très pentue : l'eau, essentiellement gravitaire, est perdue dès une faible succion, ce qui traduit une faible capacité de rétention. Le limon présente une courbe intermédiaire, avec une pente moins raide que le sable : il contient une proportion significative d'eau capillaire, retenue dans les mésopores, qui reste disponible pour les plantes jusqu'à une succion modérée. Enfin, l'argile montre une courbe très aplatie : même à forte succion, elle retient encore beaucoup d'eau, principalement sous forme d'eau liée adsorbée, non extractible par les plantes. Ainsi, plus le sol est argileux, plus l'eau est fortement retenue, le limon offrant un comportement de compromis entre disponibilité et rétention

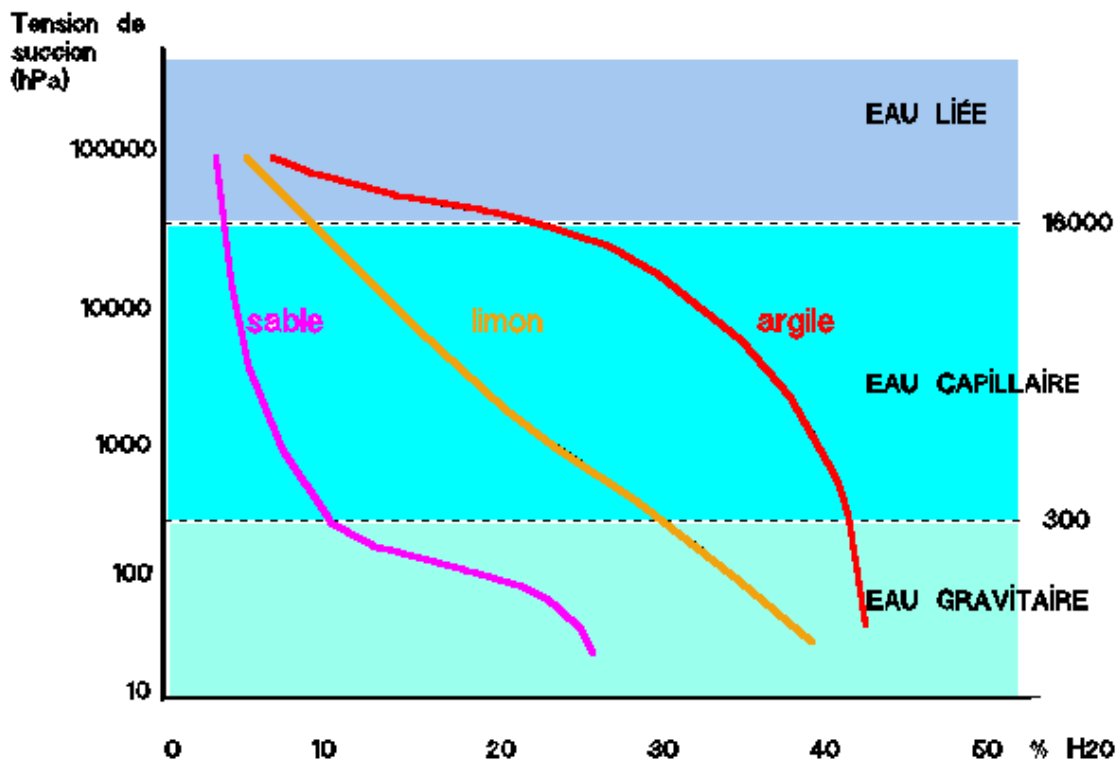


Fig 1b : Tension de succion selon la texture du sol, d'après Duchaufour.

2.3 Irrigation des cultures

2.3.1 Réserves en eau du sol

2.3.1.1 Réserve utile

La réserve d'eau que les plantes peuvent utiliser se situe entre deux seuils d'humidité critiques : l'humidité à **capacité au champ** et l'humidité au point de **flétrissement permanent**. Cette réserve utile se divise en deux parties : une réserve facilement utilisable et une réserve difficilement mobilisable, souvent appelée réserve de survie.

La réserve utile (RU) dépend de plusieurs facteurs, notamment la texture et la structure du sol, le taux de matière organique, ainsi que la profondeur des racines des plantes. Elle représente la quantité d'eau disponible pour les plantes, calculée comme la différence entre l'humidité à capacité au champ (H_{cc}) et l'humidité au point de flétrissement permanent (H_{fp}) [2].

Pour déterminer la réserve utile d'une couche de sol d'épaisseur Z , présentant des caractéristiques pédologiques homogènes, on peut utiliser la relation suivante ::

$$RU = (H_{cc} - H_{fp})Da \times Z$$

6

Où

H_{cc} : humidité pondérale à capacité au champ

H_{fp} : humidité pondérale au point de flétrissement permanent

Da : densité apparente moyenne de la couche du sol considérée.

Z : couche du sol considérée correspondante à la profondeur racinaire

Lorsqu'on n'a pas accès à la courbe de rétention d'eau (pF) du sol, qui fournit les valeurs précises de l'humidité à capacité au champ (H_{cc}) et de l'humidité au point de flétrissement permanent (H_{fp}), on peut utiliser le rapport suivant. Dans ce cas, l'humidité à capacité de rétention est considérée comme équivalente (H_e) à l'humidité, et cette valeur est alors utilisée pour calculer la réserve utile (RU) à la place de H_{cc} [3].

$$H_{pf} = \frac{H_e}{1.84}$$

7

On doit noter que cette relation n'est valable que pour des valeurs de H_e comprises entre 14 et 30 %. Autrement dit, elle ne s'applique pas aux sols sableux ayant une valeur de H_e inférieure à 14 %.

On rappelle également qu'il existe des méthodes expérimentales simples et directes de mesure in situ de la valeur de (H_{cc}) auxquelles on peut faire recours.

2.3.1.2 Réserve facilement utilisable

La réserve utile décrite précédemment est constituée de deux fractions différentes : une réserve facilement utilisable (RFU) et une réserve de survie (RS). La RFU représente du 1/3 jusqu'à 2/3 de la RU suivant le type de sol [4].

En pratique, habituellement, ce rapport est pris égal à 1/2 pour les sols dont la texture est à domination argileuse et 2/3 pour le reste des sols. On doit noter que ces rapports RU/RFU définis par rapport à la granulométrie des sols resteront très approximatifs, car en réalité, dans un même sol, la réserve facilement utilisable n'est pas égale pour des cultures caractérisées par des résistances différentes à la sécheresse.

2.3.1.3 Exemple d'application

Considérons un sol agricole avec les caractéristiques suivantes :

- Humidité à capacité au champ (H_{cc}) : 27 %

- Humidité au point de flétrissement permanent (H_{fp}) : 12 %
- Densité apparente moyenne (D_a) : 1,4 g/cm³

Calculez sa réserve utile (**RU**), sa réserve facilement utilisable (**RFU**) et sa réserve de survie (**RS**) sur une profondeur racinaire (Z) de 45 cm ?

Réponse

$$\mathbf{RU} = (H_{cc} - H_{fp}) D_a \times Z$$

$$\mathbf{RU} = (0,27 - 0,12) \times 1,4 \times 45 = 9,45 \text{ cm} = \mathbf{94,5 \text{ mm}}$$

$$\mathbf{RFU} = 2/3 \text{ RU}$$

$$\mathbf{RFU} = 2/3 \times 94,5 = \mathbf{63 \text{ mm}}$$

$$\mathbf{RS} = 94,5 - 63 = \mathbf{31,5 \text{ mm}}$$

2.3.2 Besoins en eau des cultures

Les besoins maximaux en eau, également appelés évapotranspiration maximale (ETM), représentent la quantité d'eau qu'une culture peut absorber dans des conditions optimales. Pour atteindre ce niveau de consommation, il est crucial que le sol soit constamment bien approvisionné en eau, afin que la réserve facilement utilisable ne soit jamais épuisée.

En pratique, pour maintenir cet état optimal pour une culture, il est nécessaire de gérer l'irrigation en se basant sur un bilan hydrique régulier, qui prend en compte à la fois les apports d'eau et les consommations de la culture.

Il existe deux méthodes principales pour déterminer l'ETM, reconnues par les chercheurs : une méthode directe et une méthode indirecte.

Méthode Directe

Cette approche implique de mesurer directement l'eau évaporée et transpirée par la culture à l'aide de lysimètres installés sur le terrain. Ces dispositifs permettent de réaliser un bilan hydrique simplifié et de quantifier avec précision la quantité d'eau consommée.

Le bilan est effectué à l'aide de l'équation suivante:

$$\mathbf{ETM} = I + P - D \quad \mathbf{8}$$

ETM : Evapotranspiration maximale (mm)

I: Irrigation ou apport en mm

P: Pluviométrie (mm)

D: Drainage (mm), qui correspond au volume excédentaire récupéré dans la fosse de drainage située en aval du lysimètre.

Pour garantir des mesures fiables, il est indispensable que les apports d'eau soient réguliers et suffisants afin de maintenir l'humidité du sol proche de sa capacité au champ. Cet état d'humidité est validé par un drainage continu observé en aval tout au long de la période expérimentale.

Méthode indirecte

L'évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture peut être estimée indirectement en utilisant la relation suivante [3]:

$$\mathbf{ETM = K_c \times ETP} \qquad \mathbf{9}$$

K_c : Coefficient culturel, qui varie selon le stade phénologique de la culture.

ETP : Évapotranspiration potentielle (en mm).

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la demande en eau imposée par le climat pour atteindre la saturation de l'air. Ce phénomène est influencé par divers facteurs climatiques, tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et l'insolation, qui interagissent de manière complexe.

De plus, l'ETP varie selon la position géographique, prenant en compte des éléments comme la longitude, la latitude et l'altitude. Ces variations géographiques peuvent entraîner des différences significatives dans les besoins en eau, ce qui rend l'étude de l'ETP essentielle pour une gestion efficace des ressources hydriques et pour l'agriculture durable.

Plusieurs formules empiriques sont couramment utilisées pour estimer l'ETP. Parmi elles, les méthodes de Thornthwaite, Turk et le modèle classique de Penman sont les plus répandues. Toutefois, la formule de Penman-Monteith, particulièrement adaptée aux zones semi-arides, est fortement recommandée. Elle facilite le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_o) et est disponible en plusieurs versions informatisées, en anglais et en français, via le logiciel Cropwat. Ce dernier est accessible gratuitement sur Internet, proposé par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) [5].

1-Formule de Turc

La formule de Turc ne requiert que les températures de l'air et la radiation globale ou la durée d'insolation. Elle permet de calculer l'évapotranspiration mensuelle.

Elle s'écrit de deux formes selon le cas :

a) Premier cas : si l'humidité relative de l'air est inférieure à 50 %

$$ETP = 0.4 \frac{t}{t + 15} (I_g + 50) \left(1 + \frac{50 - hr}{70} \right) \quad 10$$

b) Deuxième cas : si l'humidité relative de l'air est supérieure à 50 %

$$ETP = 0.4 \frac{t}{t + 15} (I_g + 50) \quad 11$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm)

t: température moyenne mensuelle de l'air (en °c),

Hr : humidité relative de l'air (%) durant le mois considéré,

Pour le mois de février, le coefficient 0.4 est remplacé par 0.37,

I_g : radiation globale moyenne, d'origine solaire en petite calories par cm² de surface pendant le mois considéré.

Si la radiation globale I_g n'est pas mesurée, elle peut être estimée à partir de la durée d'insolation h à l'aide de la formule suivante :

$$I_g = I_g A \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H} \right) \quad 12$$

où :

I_gA représente la radiation globale théorique (en cal/cm²/jour),

h: durée d'insolation mesurée durant le mois considéré (en heure/jour),

H : durée astronomique du jour durant le mois considéré (en heure/jour),

$$H = 362,7 + 0,2101 \times \text{Lat} + (4,085 \times \text{Lat} - 80,99) \times \text{Cos} (30,01 \times i - 188,9)$$

$$I_g A = 1035 - 9,076 \times \text{Lat} + (7,050 \times \text{Lat} + 49,90) \times \text{Cos} (29,92 \times i - 82,5)$$

Lat : latitude du lieu considéré

Les valeurs de I_gA et H sont fournies également par des tables en fonction de la latitude du lieu.

2-Formule de Thornthwaite

La formule de Thornthwaite est utilisée pour estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP) en fonction de la température, qui varie selon la latitude. Thornthwaite fait intervenir l'indice thermique, calculé à partir des températures moyennes mensuelles. Dans les zones à latitude

élevée, les variations saisonnières des températures peuvent être plus marquées, ce qui influence les valeurs de l'indice et, par conséquent, l'estimation de l'ETP.

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a F(\lambda) \quad 13$$

t : température moyenne mensuelle du mois considéré en °c,

I : indice thermique annule, égal à la somme des douze indices mensuels (i)

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

a: fonction complexe de l'indice I

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

F(λ) : Coefficient de correction tenant compte de la latitude et du mois, donné par un abaque.

2- Formule de Blaney-Cridde :

Cette formule utilise la température moyenne mensuelle et le pourcentage d'éclairement du mois considéré. Elle s'écrit comme suit :

$$ETP = K \cdot P (0.46 T + 8.13) \quad 14$$

ETP : évapotranspiration potentielle exprimée en mm /mois

K : Coefficient fonction de la culture et de la zone climatique,

P: Pourcentage d'éclairement mensuel, fonction de la latitude de la zone d'étude,

T: Température moyenne mensuelle en °c.

4-Formule de Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0.48\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_s)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad 15$$

où :

- ET_o : Évapotranspiration de référence (mm j⁻¹),

- Δ : Rapport entre la différence de pression de vapeur et la différence de température correspondant ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),
- R_n : Rayonnement net ou bilan radiatif à la surface du sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$)
- G : Flux de chaleur du sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$),
- T : Température de l'air ($^\circ\text{C}$),
- γ : Constante psychrométrique ($\gamma \sim 66 \text{ Pa } ^\circ\text{K}^{-1}$),
- u_2 : Vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol (m s^{-1}),
- e_a : Pression de vapeur (kPa),
- e_s : Pression de vapeur saturante à la température T (kPa).

2.3.3 Doses et fréquences d'irrigation

La dose d'irrigation désigne la quantité d'eau apportée à une culture par un système d'irrigation. Cette mesure est essentielle pour assurer un approvisionnement adéquat en eau, permettant aux plantes de se développer pleinement et d'atteindre leur potentiel de croissance maximal. Une irrigation appropriée favorise non seulement la santé des plantes, mais contribue également à améliorer les rendements agricoles.

Le calcul de la dose d'irrigation prend en compte les besoins en eau spécifiques de la culture, qui varient selon le type de plante et son stade de développement, ainsi que la capacité de rétention d'eau du sol. Cette capacité détermine la quantité d'eau que le sol peut stocker et rendre disponible aux racines des plantes.

La fréquence d'irrigation, quant à elle, est définie comme le nombre de fois où l'irrigation est effectuée pendant une période donnée. Elle dépend de plusieurs facteurs, tels que les besoins hydriques de la culture, les conditions climatiques (température, humidité, et vent) et la capacité de rétention d'eau du sol. Une fréquence bien ajustée est essentiel pour éviter à la fois le stress hydrique et l'excès d'eau, qui peuvent nuire à la croissance des plantes.

Pour ajuster la dose d'irrigation en fonction de la fréquence d'application et répondre aux besoins hydriques spécifiques de la culture, nous utilisons la relation suivante :

$$NDp = ETM$$

16

Où

ETM : Evapotranspiration maximale en mm, correspondant aux besoins en eau maximum de la culture pour une période donnée du cycle de la culture.

N : fréquence d'irrigation (nombre d'applications)

Dp : Dose pratique d'irrigation, correspondant à la réserve facilement utilisable (RFU).

La dose pratique d'irrigation représente la quantité d'eau à appliquer pour satisfaire les besoins en eau de la culture, tout en respectant la capacité de drainage du sol. Son calcul est indispensable pour optimiser l'efficacité de l'irrigation.

En appliquant cette relation, nous pouvons d'abord déterminer la fréquence minimale d'irrigation requise pour établir la première dose réelle maximale. Il est important de noter que si le calcul de N donne un nombre décimal, il doit être arrondi à l'entier supérieur. Cette majoration garantit une fréquence d'irrigation suffisante pour calculer une dose ne dépassant pas la dose pratique d'irrigation (RFU), évitant ainsi la saturation du sol.

2.3.4 Déficits en eau

Les déficits en eau sont des situations critiques qui peuvent affecter la croissance des cultures, particulièrement dans le contexte de la sécheresse et des changements climatiques.

La sécheresse, exacerbée par les changements climatiques, entraîne des déficits en eau plus fréquents et plus sévères. Les variations climatiques, telles que l'augmentation des températures et les modifications des régimes de précipitations, aggravent les déficits pluviométriques, rendant les périodes de stress hydrique plus communes. Cela a des conséquences directes sur la production agricole, pouvant entraîner des pertes de rendement significatives et affecter la sécurité alimentaire.

Ainsi, une compréhension approfondie des déficits en eau et de leurs dynamiques est essentielle pour développer des stratégies d'irrigation efficaces, adaptées aux conditions climatiques changeantes et aux besoins des cultures. Une gestion proactive des ressources en eau est cruciale pour atténuer les impacts de la sécheresse et assurer une agriculture durable face aux défis posés par le changement climatique.

Il existe deux types principaux de déficits en eau :

1 - Déficit pluviométrique (climatique)

Le déficit pluviométrique (dp), également connu sous le nom de déficit climatique, se définit comme la différence entre l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le volume de précipitations (P) enregistrées sur une période donnée. Il peut être exprimé par la formule suivante:

$$dp = ETP - P$$

17

Ce déficit est particulièrement préoccupant dans les régions sujettes à des fluctuations climatiques, où des périodes de sécheresse prolongées peuvent entraîner des pénuries d'eau. Il est important de noter que les excédents de précipitations ne compensent pas les déficits des mois suivants, car une grande partie de l'eau est souvent perdue par infiltration ou ruissellement. Par conséquent, le déficit pluviométrique est évalué mensuellement et peut s'accumuler au cours de l'année, aggravant les conditions de sécheresse.

2- Déficit agricole

Le déficit agricole (da) représente la différence entre le déficit pluviométrique d'un mois donné et la fraction K (RFU), qui indique la réserve facilement utilisable du sol. Le coefficient K , compris entre 0 et 1, reflète la proportion de la réserve en eau du sol qui est effectivement accessible aux plantes à un moment donné. Le déficit agricole peut être exprimé par la formule suivante:

$$da = ETP - P - K (RFU) \quad 18$$

Il est essentiel d'analyser le déficit agricole, car il influence directement la santé des cultures. En période de sécheresse, ce déficit peut augmenter rapidement, rendant l'accès à l'eau encore plus critique pour la survie des plantes. Le déficit de pointe correspond au déficit agricole mensuel le plus élevé, soulignant les moments où les cultures subissent le stress hydrique maximal.

2.3.5 Débit fictif continu et débit caractéristique

2.3.5.1 Débit fictif continu moyen

Définition

Le débit fictif continu moyen est un concept théorique qui désigne le volume d'eau constant nécessaire pour satisfaire les besoins d'irrigation d'un hectare d'une culture au cours d'une période de six mois de croissance. Bien qu'il s'agisse d'une valeur calculée, elle n'a pas d'application pratique directe, mais elle peut servir de référence pour l'évaluation des besoins en eau pour des cultures spécifiques. Ce débit permet ainsi d'identifier les exigences hydriques idéales pour optimiser la gestion de l'eau en agriculture.

La variation quotidienne des besoins en eau pendant la période de croissance de la culture est représentée dans la Fig 2 ci-dessous.

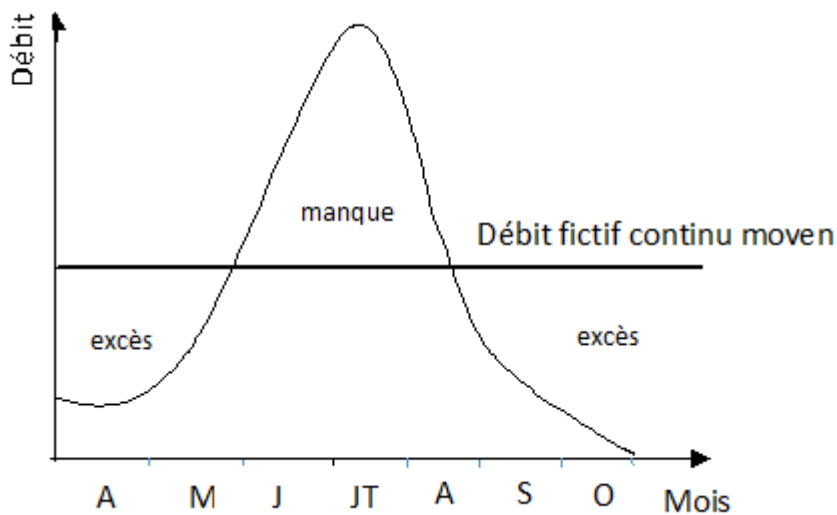


Fig 2: Courbe de variation des besoins journaliers des

On observe que les besoins en eau des plantes varient considérablement au cours de la période de végétation. Ainsi, l'application d'un débit fictif continu se révèle être une méthode simplifiée qui ne répond pas de manière adéquate aux besoins de la culture à chaque phase, comme le montre la figure ci-dessus. Cela entraîne des excès d'eau durant les premiers et derniers mois du cycle de la culture, tandis qu'en été, les plantes souffrent d'un déficit hydrique important.

2.3.5.2 Débit caractéristique

Pour exprimer les besoins journaliers en eau en millimètres de hauteur d'eau pour chaque mois, on peut les convertir en mètres cubes à fournir par hectare et par jour. Cette conversion permet de quantifier de manière précise les besoins hydriques des cultures, facilitant ainsi la planification de l'irrigation.

En traduisant ces valeurs en débits nécessaires à fournir sur une période de 24 heures, nous obtenons une série de débits fictifs continus. Ces débits, qui varient chaque mois au cours de la période de végétation, reflètent les fluctuations des besoins en eau en fonction des conditions climatiques et des stades de croissance des plantes.

Parmi ces débits, le débit maximal, correspondant au mois le plus sec, est désigné comme le débit caractéristique. Ce débit est particulièrement important car il représente le niveau d'irrigation nécessaire pour prévenir le stress hydrique durant les périodes critiques de croissance.

2.3.5.3 Exemple d'application

Si on considère que les besoins journaliers en eau d'appoint de la culture de la pomme de terre en régions tempérées, exprimés en mm dans le tableau 1 ci-dessous, déterminez les débits fictifs variables, le débit fictif continu moyen (**qfm**) et le débit caractéristique (**qc**).

Tableau 1 : Besoins en eau journalier de pointe

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre
Besoins (mm/j)	-	0,5	1	4	2	0,5

Solution

Rappel : sachant que 1 mm d'eau représente 10 m³/ha, il suffit donc de multiplier par 10 les besoins journaliers pour trouver les débits continus variables (Tableau 2).

Tableau 2 : Calcul des débits fictifs continus

Mois	Avril	Mai	juin	juillet	Aout	Septembre
Besoins (mm/j)	-	0,5	1	4	2	0,5
Débits fictifs continus (m ³ /ha/jour)	-	5	10	40	20	5

Le débit fictif continu moyen (**qfm**) est calculé comme suit :

$$\mathbf{qfm} = (5+10+40+20+5)/5 = 16 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{jour}$$

Par conversion

$$\mathbf{qfm} = \frac{16000 \text{ l/ha}}{3600 \text{ s} \times 24} = 0,18 \text{ l/s/ha}$$

On observe que ce débit fictif moyen entraîne des excès d'eau pendant les mois de mai, juin et septembre, tandis que les mois de juillet et août présentent des manques d'eau.

Il est à noter que le débit continu maximal se produit en juillet, atteignant 40 m³/ha/jour. Ce débit est donc désigné comme le débit caractéristique (**qc**). Il peut être exprimé en litres par seconde par hectare (l/s/ha) selon la formule suivante :

$$\mathbf{qc} = \frac{40000 \text{ l/ha}}{3600 \text{ s} \times 24} = 0,46 \text{ l/s/ha}$$

Remarque : Le débit caractéristique peut être ajusté à la hausse pour tenir compte des pertes d'eau associées au système d'irrigation, qui peuvent atteindre environ 25 %. Ces pertes peuvent résulter de diverses causes, telles que l'évaporation, les fuites dans les canalisations, ou l'inefficacité des dispositifs d'irrigation utilisés.

Ainsi, pour compenser ces pertes, il est essentiel d'augmenter le débit d'eau fourni. Par conséquent, le débit ajusté peut être calculé en intégrant ce taux de perte, ce qui garantit que les besoins hydriques des cultures sont pleinement satisfaits tout en tenant compte des inefficacités du système d'irrigation. On aura donc un débit caractéristique ajusté comme suit :

$$q_c = 0,46 + 0,25 \times 0,46 = 0,58 \text{ l/s/ha}$$

Ce même débit caractéristique peut être réduit en cas de précipitations. Lorsque des pluies surviennent, elles contribuent à l'approvisionnement en eau du sol, diminuant ainsi la nécessité d'irrigation. Il est donc important d'ajuster le débit d'eau à fournir en tenant compte des apports pluviaux.

2.4 Irrigation gravitaire ou de surface

2.4.1 Irrigation par ruissellement ou déversement

2.4.1.1 Principe

L'irrigation par ruissellement est une méthode où l'eau ruisselle sous forme de nappe sur la surface du sol tout en s'infiltrant verticalement en même temps. Il appartient à cette catégorie, cinq types : l'irrigation par planche, l'irrigation par rigole en pente ou rases, l'irrigation par plans inclinés et l'irrigation par ados [6].

Nous développons dans ce cours l'irrigation par planche. Cette technique soit efficace, il est essentiel d'aménager le terrain en planches de ruissellement, en veillant à créer une pente appropriée afin d'optimiser l'irrigation. Il est crucial d'établir un équilibre entre la vitesse de ruissellement de l'eau à la surface et la perméabilité du sol en profondeur. Une pente trop forte peut provoquer un ruissellement excessif, tandis qu'une pente trop faible peut entraîner une stagnation de l'eau. Ainsi, un angle de pente bien défini garantit un écoulement uniforme, permettant à l'eau de s'infiltrer efficacement et d'atteindre la profondeur nécessaire pour fournir la quantité d'irrigation précise dans le délai souhaité.

Une pente appropriée est essentielle pour assurer une irrigation rationnelle. Selon Crevat la théorie du ruissellement repose sur deux paramètres fondamentaux : la vitesse à laquelle la nappe d'eau s'écoule et le débit unitaire de déversement de la rigole, mesuré par mètre de

largeur de la planche de ruissellement. Crevat souligne également que le ruissellement est influencé par la pente du terrain et l'épaisseur de la nappe d'eau présente à la surface. Il attribue un coefficient spécifique à chaque type de surface, variant entre 5 et 20, selon la nature de celle-ci et sa capacité à favoriser un écoulement libre de l'eau [3].

2.4.1.2 Paramètres caractéristiques

Pour une irrigation par ruissellement ou déversement efficace, il est essentiel de bien comprendre et calculer les paramètres suivants [3].:

1. **Longueur** : C'est la distance sur laquelle l'eau s'écoule. Elle influence le temps de ruissellement et la profondeur d'infiltration.
2. **Largeur de la planche** : Elle détermine la surface cultivée à irriguer et dépend du débit de déversement disponible.
3. **Débit unitaire** : Il s'agit du volume d'eau appliqué par unité de temps et par unité de largeur de planche (ex. : m³/s/m).
4. **Hauteur de la nappe en tête de la planche** : Cette hauteur affecte la pression de l'eau et sa capacité à infiltrer le sol.
5. **Vitesse de ruissellement à l'extrémité supérieure** : Elle permet d'évaluer si l'irrigation est réalisée de manière rationnelle.
6. **Durée d'irrigation** : Elle est cruciale pour organiser et gérer l'irrigation de la surface cultivée.

Une bonne maîtrise de ces paramètres garantit une irrigation efficace et optimale.

1- Longueur de la planche (L)

$$L = \frac{\alpha(dr)^2}{4k} \quad 19$$

Sachant que : $\alpha = n\sqrt{I}$

où

n : coefficient de Crevat qui dépend de la nature de la surface du sol, il varie de 5 à 20.

I : pente du terrain, sachant que la pente de la nappe d'eau étant négligeable.

2- Largeur de la planche (λ)

$$\lambda = \frac{m}{k \times L} \quad 20$$

3- Surface de la planche (s)

$$s = L \times \lambda \quad 21$$

4- Débit unitaire (r) de ruissellement ou de déversement en tête de la planche par unité de largeur de la planche

$$r = K \times L \quad 22$$

ou bien

$$r = \frac{m}{\lambda} \quad 23$$

5- Hauteur de la nappe en tête de la planche (H)

$$H = \frac{dr}{2} \quad 24$$

6- Durée d'irrigation (D)

$$D = \frac{dr}{K} \quad 25$$

7- Vitesse de l'eau en tête de la planche (V)

$$V = \alpha \times H \quad 26$$

2.4.1.3 Exemple d'application

Dans cet exemple d'irrigation par ruissellement, nous avons une culture maraîchère cultivée sur un sol avec une perméabilité moyenne de 18 cm/heure et une pente de 1 %. En prenant un coefficient de Crevat de 20, la dose d'irrigation réelle est de 900 m³/ha, tandis que le module d'irrigation disponible est de 35 l/s. Nous allons procéder au calcul des paramètres techniques associés selon le principe de Crevat.

- 1-Longueur de la planche de ruissellement
2. Largeur de la planche de ruissellement
3. Surface de la planche de ruissellement
4. Débit unitaire de ruissellement ou déversement
5. Hauteur de la nappe en tête de la planche
6. Durée d'irrigation
7. Vitesse de l'eau en tête de la planche

Solution

1- Longueur de la planche de ruissellement (L)

Perméabilité $k = 18 \text{ cm/heure} = 0.00005 \text{ m/s}$

Dose d'irrigation $= 900 \text{ m}^3 / \text{ha} = 0.09 \text{ m}$

Module d'irrigation (m) $= 35 \text{ l/s} = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$

Si on prend $\alpha = n\sqrt{I}$

n : coefficient de Crevat $= 20$

I : pente du terrain $= 1. \% = 0.01$

$\alpha = n\sqrt{I} = 20 \sqrt{0.01} = 2$

$$L = \frac{\alpha(dr)^2}{4k} = \frac{2(0.09)^2}{4 \times 0.00005} = 81\text{m}$$

2- Largeur de la planche (λ)

$$\lambda = \frac{m}{k \times L} = \frac{0.035}{0.00005 \times 81} = 8.64 \text{ m}$$

3- Surface de la planche (s)

$$s = L \times \lambda = 81 \times 8.64 = 699.84 \text{ m}^2$$

4- Débit unitaire (r) de ruissellement ou déversement

$$r = K \times L = 0.00005 \times 81 = 0.00405 \text{ m}^3/\text{m de largeur}$$

5- Hauteur de la nappe en tête de la planche (H)

$$H = \frac{dr}{2} = \frac{0.09}{2} = 0.045 \text{ m}$$

6- Durée d'irrigation (D)

$$D = \frac{dr}{K} = \frac{0.09}{0.00005} = 1800 \text{ secondes} = 30 \text{ mn}$$

7- Vitesse de l'eau en tête de la planche (v)

$$v = \alpha \times H = 2.19 \times 0.045 = 0.098 \text{ m/s}$$

2.4.2 Irrigation à la raie

2.4.2.1 Description générale

L'irrigation à la raie est une technique d'irrigation par surface qui consiste à créer des raies dans le sol. Ces raies, qui sont de petites rigoles ou sillons creusés parallèlement, ont pour but de canaliser l'eau d'irrigation de manière efficace (Fig. 3). Cette méthode permet une distribution contrôlée de l'eau sur les cultures, facilitant ainsi l'infiltration latérale dans le sol tout en évitant l'inondation des parcelles.

L'irrigation à la raie offre plusieurs avantages notables. Tout d'abord, elle assure une distribution uniforme de l'eau, ce qui est essentiel pour le développement harmonieux des plantes. De plus, cette méthode est particulièrement adaptable aux champs présentant des surfaces irrégulières, permettant ainsi de s'ajuster aux variations topographiques.

Sur le plan technique, les raies sont généralement orientées perpendiculairement à la conduite d'amenée, optimisant ainsi le flux d'eau vers les cultures. L'espacement entre les raies varie de 0,75 à 1 m, voire davantage, en fonction du type de sol et des cultures. Une pente comprise entre 0,2 et 3 % est recommandée pour garantir un bon écoulement de l'eau. Les sections des raies peuvent adopter des formes variées, comme triangulaires, trapézoïdales ou paraboliques, avec une largeur variant de 25 à 40 cm et une profondeur atteignant 15 à 30 cm.

Enfin, l'irrigation à la raie se prête particulièrement à la mécanisation, facilitée par des systèmes tels que les siphons et les rampes à vannettes, rendant ainsi le processus d'irrigation plus efficace et moins laborieux.

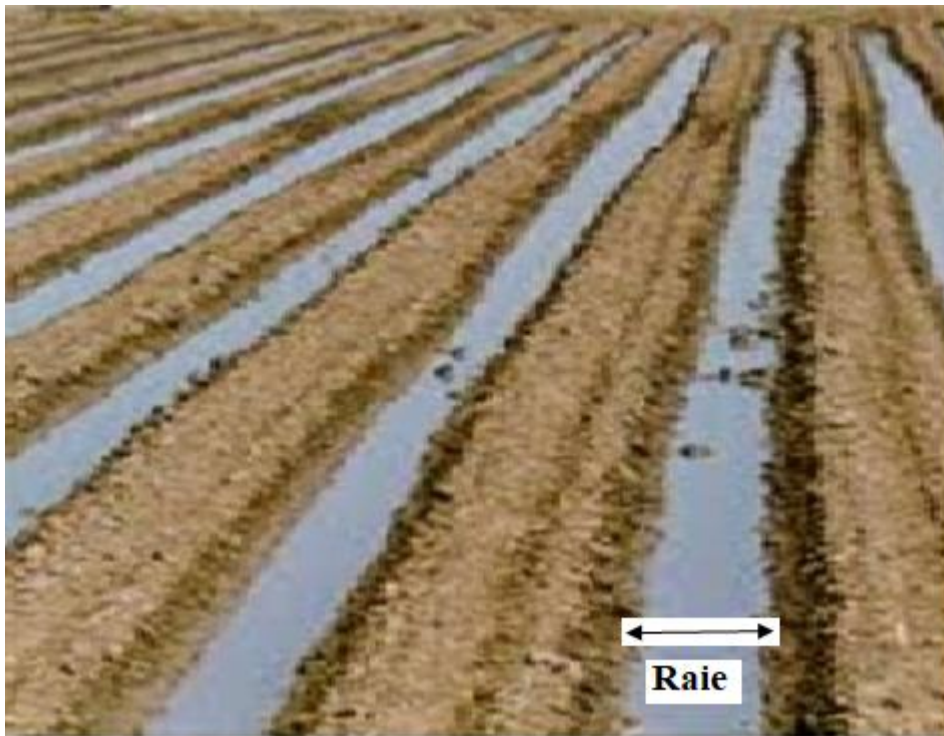


Fig 3: Irrigation à la raie

Les siphons sont des conduits de petit diamètre, généralement compris entre 20 et 50 mm, et mesurant de 1 à 1,50 m de long. Ils sont principalement fabriqués à partir de matériaux rigides ou semi-rigides, le PVC étant le matériau le plus courant en raison de sa durabilité et de sa résistance à la corrosion (Fig. 4).

Ces dispositifs fonctionnent efficacement sous une faible pression, typiquement comprise entre 10 et 20 cm. Dans ces conditions, ils peuvent délivrer un débit variant approximativement de 0,4 l/s à 2 l/s. Cette capacité de débit rend les siphons adaptés à une variété d'applications en irrigation, permettant un contrôle précis de l'eau distribuée aux cultures.

Pour ajuster les débits, plusieurs méthodes peuvent être employées. Par exemple, des bouchons perforés peuvent être utilisés à la sortie du siphon pour moduler le flux. De plus, il est possible de choisir des siphons de diamètres différents selon les besoins spécifiques de l'irrigation. Enfin, le nombre de siphons en service peut également être modifié pour augmenter ou diminuer le débit total.

Un des principaux atouts des siphons réside dans leur coût abordable, ce qui en fait une option économique pour l'irrigation. En dépit de leur prix réduit, ils garantissent une bonne répartition des débits, assurant ainsi une irrigation efficace et uniforme sur les parcelles cultivées. Leur simplicité d'installation et d'entretien constitue également un avantage considérable, rendant leur utilisation accessible même pour les exploitations de petite taille.

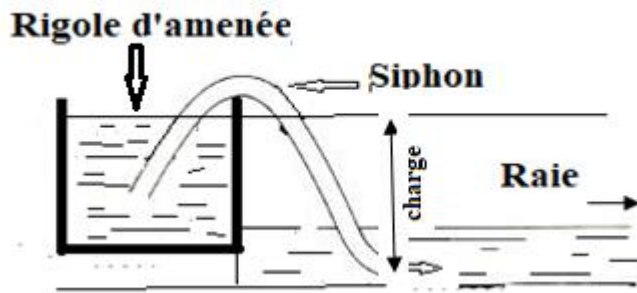


Fig 4: Alimentation de la raie par un siphon

2.4.2.2 Caractéristiques appropriées

a) Cultures recommandées

Cette technique est particulièrement adaptée aux cultures en ligne, telles que les légumes, permettant une irrigation ciblée directement aux racines des plantes. Elle est vivement conseillée pour les espèces sensibles à l'engorgement de leur feuillage ou de leur collet, car une exposition prolongée à l'eau peut être préjudiciable.

b) Nature des sols

La méthode d'irrigation à la raie est adaptée à la plupart des types de sols. Cependant, elle n'est pas recommandée pour les sols sableux, où l'eau s'infiltrerait rapidement, nécessitant des sillons courts (moins de 110 m) pour minimiser les pertes par percolation. À l'inverse, dans les sols argileux, le taux d'infiltration est faible, permettant des sillons plus longs, ce qui optimise l'irrigation.

c) Pente et longueur des sillons

La longueur des sillons est influencée par la pente du terrain, le type de sol, le débit d'eau, la dose d'irrigation, les pratiques agricoles et la longueur du champ. Un sillon peut être plus long sur un terrain en pente, mais sa pente ne doit pas dépasser 0,5 % (0,5 mètre d'élévation pour chaque 100 mètre de distance horizontale). Cette limite est fixée pour prévenir l'érosion du sol, car une pente trop raide peut entraîner un ruissellement excessif et des pertes de sol. Si la pente du terrain naturel dépasse **0,5 %**, il est essentiel de maintenir la pente des sillons dans des limites acceptables pour prévenir l'érosion. Dans ce cas, les sillons doivent être aménagés en biais ou le long des courbes de niveau, ce qui permet de réduire le risque d'érosion tout en

optimisant l'efficacité de l'irrigation. Cette approche aide à gérer le ruissellement de l'eau et à préserver la structure du sol.

2.4.3 Irrigation par submersion

2.4.3.1 Principe

La technique d'irrigation par submersion, également connue sous le nom d'irrigation par inondation, nécessite un aménagement préalable du terrain en bassins. Ces bassins doivent être entourés de digues basses ou surélevées. Cette méthode consiste à recouvrir le sol d'une couche d'eau, maintenue dans les bassins jusqu'à son infiltration complète dans le sol à la profondeur souhaitée. L'irrigation par submersion se divise en deux types : l'irrigation continue, où la profondeur d'eau est maintenue, et l'irrigation alternée, qui permet l'écoulement de l'eau non infiltrée dans les colatures.

L'irrigation par submersion est principalement utilisée pour irriguer les rizières plates et convient aux cultures qui peuvent supporter une inondation prolongée. Pour réussir cette technique, il est essentiel de pratiquer une irrigation intermittente. Cela permet au sol de s'assécher et de rester bien aéré, assurant ainsi une bonne respiration des plantes. La méthode d'irrigation par submersion est également employée pour l'arrosage des arbres fruitiers. Dans ce cas, une petite cuvette, ou bassin, est aménagée autour de chaque arbre. Cette approche permet de retenir l'eau, assurant ainsi une irrigation efficace et adaptée aux besoins spécifiques de chaque arbre.

2.4.3.2 Eléments caractéristiques des bassins de submersion

Les dimensions d'un bassin de submersion, notamment sa surface et la hauteur d'eau à atteindre et à maintenir, influencent directement le temps nécessaire pour le remplir. Il est important de noter qu'au cours du remplissage, une première perte de volume d'eau (**V2**) se produit en raison de l'infiltration dans le sol non saturé. De plus, une autre perte (**V3**) survient par évaporation. En tenant compte de ces facteurs, on peut déterminer le débit nécessaire de la conduite d'amenée pour assurer une irrigation efficace. Ce débit (**Q1**) commence à un niveau élevé pendant le remplissage, jusqu'à atteindre la hauteur d'eau souhaitée, puis il diminue à un niveau (**Q2**) plus bas, suffisant pour compenser les pertes dues à l'infiltration et à l'évaporation durant la période de submersion.

Ces facteurs peuvent se synthétiser dans les relations suivantes :

a) Volume d'eau nécessaire pour la culture (V1)

$$V1 = S \times h \quad 27$$

Où

S : Surface du bassin

h : hauteur moyenne de l'eau dans le bassin

b) Volume d'eau perdu par infiltration (V2)

$$V2 = S \times K \times Tr \quad 28$$

Où

K : perméabilité du sol en m/s

Tr : temps de remplissage du bassin

c) Volume d'eau perdu par évaporation (V3)

$$V3 = e \times S \times Tr \quad 29$$

Où

e : évaporation par unité de temps (m/s)

Donc, le volume d'eau total (**Vt**) nécessaire pour garantir les volumes d'eau précédents s'écrit ;

$$Vt = V1 + V2 + V3 \quad 30$$

$$Vt = Sxh + S \times K \times Tr + e \times S \times Tr$$

Par conséquent le débit de la conduite d'amenée (Q) est égal au rapport du volume d'eau total au (**Vt**) au temps de remplissage du bassin (**Tr**) et s'écrit :

$$Q1 = \frac{Vt}{Tr} = \frac{Sxh+S \times K \times Tr+e \times S \times Tr}{Tr} \quad 31$$

$$Q1 = \frac{S}{Tr} [(h + Tr (K + e))] \quad 32$$

2.4.3.3 Exemple d'application

Déterminer le débit à assurer pour le remplissage d'un bassin de submersion d'une superficie (S) de 0.8 ha, sachant que :

- La hauteur d'eau moyenne (h) à atteindre dans le bassin est fixée à 45 cm,
- Le temps de remplissage (Tr) est de 48 heures,
- La perméabilité moyenne (K) du sol est 0.00001 m/s,
- L'évaporation (e) est de 12.96 mm/jour,

Solution

Le débit de la conduite d'amenée (Q) à assurer pour le remplissage du bassin est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$Q1 = \frac{S}{Tr} [(h + Tr (K + e))]$$

Conversion des unités

$$S = 0.8 \text{ ha} = 8000 \text{ m}^2$$

$$h = 45 \text{ cm} = 0.45 \text{ m}$$

$$Tr = 48 \text{ h} \times 3600 = 172800 \text{ s},$$

$$e = 12.96 \text{ mm/jour} = 0.0000001 \text{ m/s}$$

$$K = 0.00001 \text{ m/s}$$

$$Q1 = \frac{8000}{172800} [(0.45 + 172800 (0.00001 + 0.0000001))] = \mathbf{0.097 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Ce débit passera à deuxième niveau de débit (Q2) plus faible pour compenser les pertes dues à l'infiltration et à l'évaporation durant la période de submersion.

$$Q2 = S(K + e) = 8000 (0.00001 + 0.0000001) = \mathbf{0.08 \text{ m}^3/\text{s}}$$

2.5 Irrigation par aspersion

2.5.1 Principe

L'irrigation par aspersion est une méthode moderne et efficace visant à distribuer l'eau de manière uniforme sur une parcelle cultivée, imitant ainsi les effets bénéfiques de la pluie naturelle. Ce système repose sur l'utilisation d'équipements spécialisés, tels que des tuyaux, des pompes et des arroseurs, qui atomisent l'eau en fines gouttelettes. Cette technique permet

d'assurer une couverture homogène du sol et des cultures, favorisant ainsi une croissance saine des plantes.

Le fonctionnement de l'irrigation par aspersion commence par l'acheminement de l'eau à partir d'une source, comme un puits ou un réservoir, via des tuyaux jusqu'aux arroseurs. Les pompes jouent un rôle crucial en créant la pression nécessaire pour projeter l'eau à travers les arroseurs, qui sont conçus pour disperser l'eau sous forme de gouttes fine.

2.5.2 : Avantages et inconvénients de l'aspersion

A/ Avantages

- 1. Accessibilité technique** : L'irrigation par aspersion ne requiert pas de compétences techniques approfondies pour sa mise en œuvre. Cette simplicité d'installation et de fonctionnement permet à de nombreux agriculteurs, même ceux avec peu d'expérience, de l'adopter facilement. Cela favorise une adoption plus large de techniques d'irrigation modernes, contribuant ainsi à améliorer la productivité agricole.
- 2. Installation sans aménagement préalable** : Ce système ne nécessite pas d'aménagement complexe de la surface, ce qui facilite son installation, même sur des terrains accidentés. Cela le rend particulièrement adapté aux parcelles présentant une topographie irrégulière, permettant aux agriculteurs de tirer parti de terrains qui pourraient autrement être difficiles à irriguer efficacement.
- 3. Adaptabilité à la nature du sol** : L'irrigation par aspersion peut être utilisée indépendamment de la nature du sol, y compris dans des sols à forte perméabilité. Ce système peut être ajusté en fonction des caractéristiques spécifiques du sol et des besoins des cultures, permettant une gestion plus efficace de l'eau. Cela contribue à l'optimisation des rendements en s'assurant que chaque type de sol reçoit l'apport hydrique adéquat.
- 4. Oxygénation optimale de l'eau** : En pulvérisant l'eau dans l'air, l'irrigation par aspersion favorise une oxygénation optimale, ce qui est bénéfique pour les racines des plantes. Les gouttes qui retombent ressemblent à de la pluie naturelle, ce qui aide à maintenir un environnement de croissance sain. De plus, ce système permet d'utiliser des eaux acides ou résiduaires, offrant une solution durable pour l'irrigation tout en réduisant la dépendance à l'eau potable.
- 5. Économies d'eau** : L'irrigation par aspersion permet des économies d'eau considérables par rapport aux méthodes traditionnelles comme l'irrigation par ruissellement et la submersion. Grâce à un contrôle précis de la quantité d'eau distribuée, ce système est

essentiel pour une gestion efficace des ressources hydriques, particulièrement dans les zones où l'eau est limitée. Cela permet aux agriculteurs de maximiser la productivité tout en préservant les ressources en eau.

- 6. Automatisation et gestion précise :** L'irrigation par aspersion offre la possibilité d'automatisation, ce qui permet une gestion précise de l'eau. Les systèmes automatisés peuvent ajuster les cycles d'irrigation en fonction des conditions climatiques et des besoins des cultures, ce qui réduit les besoins en main-d'œuvre et économise du temps. Cette automatisation contribue également à une irrigation plus efficace, minimisant les erreurs humaines et maximisant l'utilisation des ressources.

B/ Inconvénients

- 1-** Le coût d'installation d'un système d'irrigation par aspersion est généralement plus élevé que celui d'autres méthodes, en raison de la nécessité d'équipements spécifiques, notamment des pompes performantes, ainsi que de la mise en place de canalisations adaptées.

- 2-** L'irrigation par aspersion est sensible aux variations des conditions météorologiques défavorables, telles que le vent, qui peut disperser l'eau de manière inégale. Cela peut entraîner une réduction de l'efficacité du système d'irrigation.

- 3-** L'irrigation par aspersion favorise la croissance des mauvaises herbes en distribuant de l'eau sur l'ensemble de la surface cultivée. Cette humidité ambiante crée un environnement propice au développement de ces plantes indésirables, ce qui peut entraîner un parasitisme nutritionnel. Les mauvaises herbes rivalisent avec les cultures pour les nutriments et l'eau, réduisant ainsi l'efficacité des ressources disponibles et compromettant la santé des plantes cultivées. Par conséquent, la gestion des mauvaises herbes devient essentielle pour maintenir une productivité optimale.

- 4-** L'irrigation par aspersion peut entraîner un refroidissement des sols, notamment lorsque des eaux souterraines, qui sont généralement froides, sont utilisées directement sans avoir préalablement été réchauffées dans des bassins d'irrigation exposés au soleil. Ce phénomène peut affecter négativement la température du sol, entraînant des conséquences comme des problèmes de fécondation, tels que la coulure, ainsi qu'un retard dans la maturation des cultures.

- 5-** L'irrigation par aspersion peut entraîner un tassement du sol en provoquant le compactage des particules. L'infiltration de l'eau favorise le mouvement des particules, les rapprochant et augmentant ainsi la densité du sol.

6- L'irrigation par aspersion peut également favoriser l'érosion du sol. L'eau projetée peut entraîner des particules superficielles, surtout si le sol est saturé ou mal structuré, ce qui réduit la protection naturelle contre l'érosion.

2.5.3 Composantes et types d'installation de l'aspersion

L'irrigation par aspersion est un système sophistiqué qui nécessite une compréhension approfondie de ses composantes pour fonctionner efficacement. Chaque élément de ce système joue un rôle crucial dans la distribution uniforme de l'eau, garantissant ainsi une irrigation rationnelle et optimale des cultures. Pour assurer une performance maximale, il est essentiel de connaître les différentes parties qui composent ce système, ainsi que les divers types d'installations qui peuvent être mises en œuvre selon les besoins spécifiques des exploitations agricoles.

2.5.3.1 Composantes du système d'aspersion

1- Appareils de pompage

Le système de pompage est crucial pour garantir un débit d'eau suffisant. Il doit fournir la pression nécessaire pour assurer le bon fonctionnement des arroseurs et la projection adéquate de l'eau sur la parcelle.

2- Canalisation principale

La canalisation principale est le conduit principal qui transporte l'eau directement du système de pompage vers les différentes zones d'irrigation. Elle est conçue pour supporter de grandes quantités d'eau sous pression, garantissant ainsi un approvisionnement constant et uniforme.

- **Rôle :**

- Assurer le transport de l'eau à haute capacité.
- Maintenir une pression adéquate pour alimenter les canalisations secondaires et les arroseurs.
- Minimiser les pertes d'eau dues à des fuites ou à une mauvaise conception.

3- Canalisations secondaires

Les canalisations secondaires se ramifient à partir de la canalisation principale et se dirigent vers les différentes unités parcellaire. Elles sont souvent de plus petit diamètre, adaptées à la distribution de l'eau vers des zones spécifiques.

- **Rôle :**
 - Distribuer l'eau de manière ciblée aux arroseurs
 - Permettre un contrôle plus précis de l'apport en eau selon les besoins spécifiques de chaque parcelle.

4- Appareils de projection de l'eau

Les dispositifs d'irrigation, appelés arroseurs, jouent un rôle essentiel dans la distribution de l'eau sur les cultures. Leur conception varie en forme, portée et densité d'aspersion, ce qui affecte leur efficacité et leur capacité à s'adapter à différents types de cultures et de terrains.

Les arroseurs se distinguent par une large gamme de caractéristiques, avec des densités d'aspersion allant de 2 à 20 mm/heure. Cette diversité permet de répondre aux besoins spécifiques des plantes, qu'il s'agisse de cultures sensibles à l'humidité ou nécessitant une irrigation plus intense. En choisissant le bon type d'arroseur, les agriculteurs optimisent l'utilisation de l'eau et minimisent les pertes.

Il est crucial que ces dispositifs fonctionnent avec une pression d'eau adéquate, garantissant ainsi leur efficacité. Un asperseur, élément clé des systèmes d'irrigation, projette de l'eau sous pression pour arroser les cultures en diffusant de fines gouttelettes, imitant la pluie naturelle.

La performance d'un asperseur dépend de plusieurs facteurs, dont la pression de l'eau, le diamètre des buses et la disposition des arroseurs dans le champ (Fig 5). Ces éléments influencent la portée, le débit et la répartition de l'eau, assurant un arrosage uniforme et optimal pour favoriser la croissance des cultures.



Fig 5. Arroseurs en fonctionnement sur le Champ

Canon d'irrigation

Le canon d'irrigation est un dispositif d'aspersion (Fig 6). Il est constitué d'un corps pivotant en forme de lance et d'un mécanisme à bras oscillant, similaire aux asperseurs utilisés dans les jardins. Le bras se déplace de manière alternée grâce au jet d'eau, à un ressort et à des butées. Les mouvements du bras entraînent le déplacement de la lance autour de son pivot. La forme et la section de la buse de la lance influencent le débit du jet et sa portée pour une pression donnée, tandis que le réglage des butées permet de définir l'angle de l'aire d'arrosage.



Fig 6.: Canon d'irrigation en fonctionnement sur le champ

Enrouleur d'irrigation

L'enrouleur d'irrigation est un dispositif d'irrigation par aspersion qui utilise une bobine de tuyau pour arroser une zone spécifique (Fig 7). Son fonctionnement repose sur le déroulement et l'enroulement de cette bobine, permettant ainsi de couvrir de vastes surfaces. Lors de l'arrosage, l'enrouleur subit une force oblique considérable en raison de la traction exercée sur le tuyau. Pour garantir sa stabilité, des bûches réglables en longueur sont installées, assurant un ancrage solide dans le sol. Ce mécanisme permet une irrigation efficace et homogène, tout en minimisant les risques de déplacement du système.



Fig 7. Enrouleur en fonctionnement sur le Champ

2.5.3.2 Types d'installation du système d'aspersion

- **Installation fixe**

Dans ce cas, les éléments du système sont installés de manière permanente. Ils sont conçus pour irriguer efficacement une parcelle spécifique sans nécessiter de déplacement.

- **Installation mobile**

Ces systèmes sont modulaires et peuvent être déplacés d'une parcelle à une autre, permettant une flexibilité d'utilisation en fonction des besoins d'irrigation.

- **Installation mixte**

Ce type d'installation combine les caractéristiques des systèmes fixe et mobile. Une partie, généralement la canalisation principale, est installée de manière permanente, tandis que le reste du système, incluant les arroseurs et les canalisations secondaires, est mobile. Cela permet de bénéficier de la stabilité et de la durabilité de l'installation fixe tout en offrant la flexibilité d'ajuster l'irrigation selon les besoins spécifiques des différentes parcelles.

2.5.3.3 Dispositions des asperseurs et uniformité de l'irrigation

La quantité d'eau atteignant le sol le long du jet d'asperseur diminue à mesure que l'on s'éloigne de celui-ci. Pour assurer une répartition uniforme de l'eau, il est essentiel de placer les asperseurs de manière à garantir un chevauchement adéquat des jets. Ils sont généralement agencés en carré, rectangle ou triangle.

Les écartements couramment utilisés entre les asperseurs et les rampes sont de 6x6, 12x12, 18x18 et 24x24 mètres. Il est également possible d'adopter des écartements de 6x12, 12x18 ou 18x24 mètres. Cependant, une sensibilité accrue au vent est observée avec des écartements plus larges, ce qui peut entraîner une plus grande hétérogénéité de la pluviométrie. C'est pourquoi le maraîchage, qui nécessite une régularité pluviométrique élevée, ne devrait utiliser que des écartements réduits, comme 6x6, 6x12 ou 12x12.

La disposition en carré (Fig 8) permet une répartition uniforme de la pluviométrie. Il est recommandé d'utiliser des dimensions de 12 x 12 m, avec une distance de $R\sqrt{2}$ entre deux asperseurs, où R représente le rayon du cercle formé par l'asperseur [8].

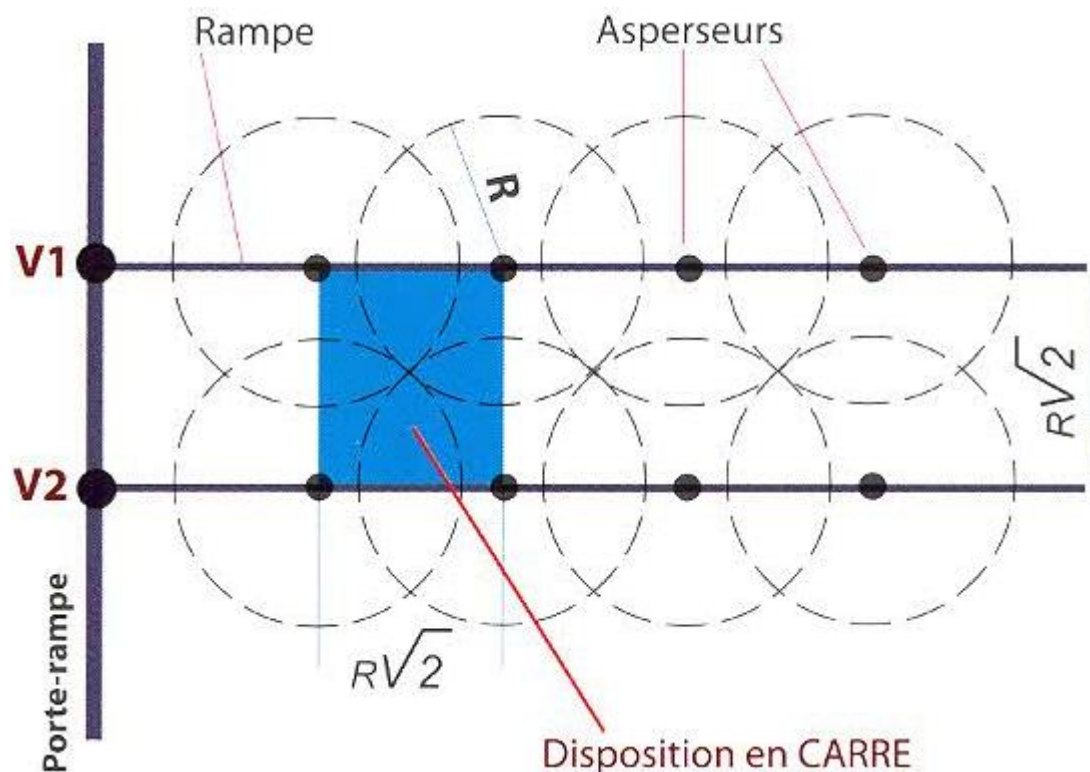


Fig 8 : Asperseurs agencés en disposition carré

La disposition en rectangle (Fig 9) est recommandée pour les régions exposées au vent. Les rampes doivent être orientées dans le sens du vent. Les dimensions suggérées sont de 12 x 18 m. La distance entre deux asperseurs sur une rampe est de $R\sqrt{2}$, et la distance entre deux rampes est de $R\sqrt{3}$ [8].

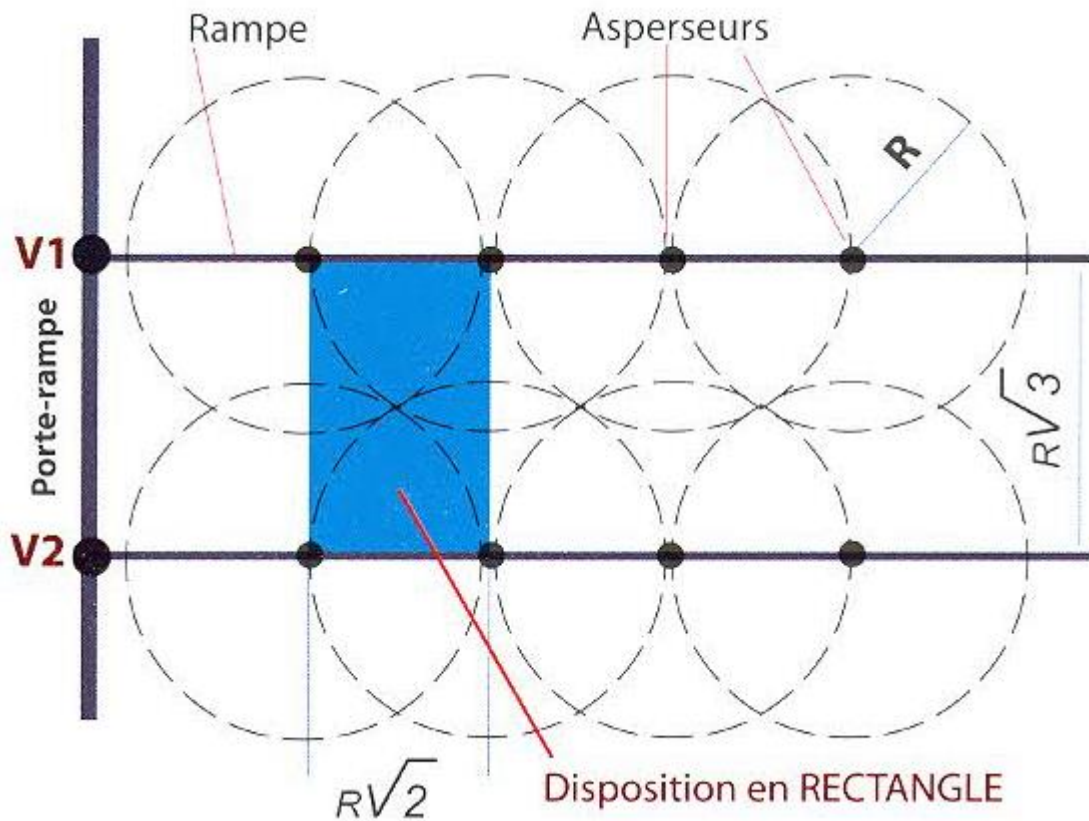


Fig 9 : Asperseurs agencés en disposition rectangle

La disposition en triangle (Fig 10) permet un bon recouvrement de la pluviométrie, mais l'installation du réseau peut être complexe. La distance entre deux asperseurs sur une rampe est de $R\sqrt{3}$, tandis que la distance entre deux rampes est de $R\sqrt{3}$ [8].

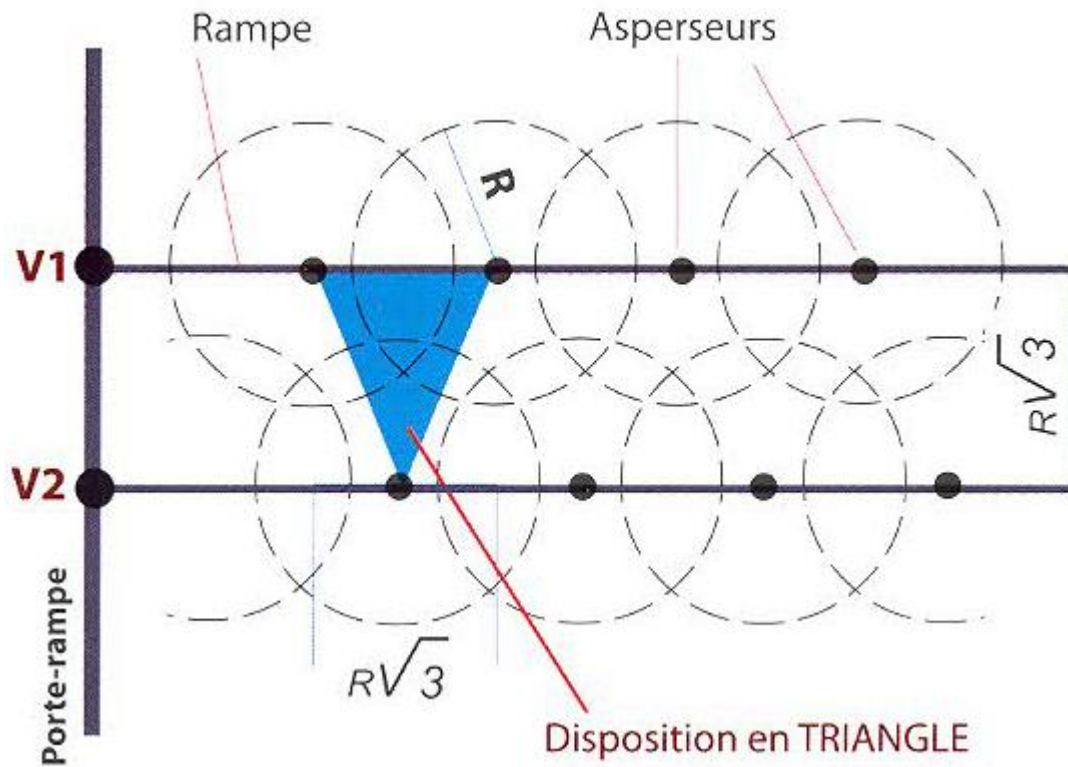


Fig 10: Asperseurs agencés en disposition triangle

Le coefficient d'uniformité de Christiansen (CU) est un indicateur essentiel de la performance des systèmes d'irrigation. Il est couramment utilisé pour mesurer la distribution homogène de l'eau sur les surfaces irriguées. Un CU dépassant 80 % est généralement jugé acceptable pour garantir une irrigation efficace et optimale. Ce coefficient joue un rôle crucial dans l'évaluation de la qualité de l'arrosage, permettant ainsi d'identifier les zones qui nécessitent des ajustements ou des améliorations. En analysant le CU, les agriculteurs et les gestionnaires de l'eau peuvent prendre des décisions éclairées pour maximiser l'efficacité de l'irrigation et minimiser le gaspillage d'eau. La formule de calcul du coefficient d'uniformité de Christiansen (CU), ajusté par Merriam et Keller s'écrit comme suit:

$$\text{CU} = 100 \left(1 - \frac{\sum |h_i - h_m|}{n \times h_m} \right) \quad 33$$

Où :

h_i : hauteur d'eau recueillie par un pluviomètre (mm)

h_m : hauteur d'eau moyenne appliquée sur la parcelle irriguée (mm)

n : nombre de pluviomètres

Il est recommandé d'utiliser des asperseurs avec un coefficient d'uniformité (CU) d'au moins 85 % [9]. Selon certaines études, un coefficient de distribution de l'eau inférieur à 60 % signale une sous-irrigation dans la zone irriguée [10].

Pivot d'irrigation

L'irrigation à pivot central est une méthode d'irrigation par aspersion, où des buses tournent autour d'un pivot central (Fig 11). Ce système est largement utilisé aux États-Unis, en Europe et en Afrique, et est particulièrement adapté aux terrains plats.

Il se compose de plusieurs segments de tuyaux, en acier galvanisé ou en aluminium, mesurant entre 30 et 60 mètres de long. Ces segments sont assemblés et soutenus par un essieu à roues, avec des arroseurs disposés le long des tuyaux. L'eau est fournie par le pivot central, autour duquel le système tourne.

À l'extrémité du pivot, un porte-à-faux soutient le tuyau avec des câbles, plutôt qu'avec un essieu. Cette extrémité est équipée d'un canon capable de projeter l'eau jusqu'à 30 mètres.



Fig 11: Le pivot d'irrigation en fonctionnement sur le champ

2.5.4 Théorie de l'aspersion

2.5.4.1 Principe de l'irrigation rationnelle

La théorie de l'aspersion repose sur plusieurs principes fondamentaux qui régissent la distribution de l'eau sur les cultures. Pour garantir une irrigation par aspersion efficace, deux conditions essentielles doivent être respectées :

- **Première Condition**

L'égalité suivante doit être maintenue :

$$s = \frac{m}{k}$$

où

s : unité parcellaire d'irrigation, qui représente la surface sur laquelle l'irrigation est appliquée.

m : module d'irrigation, exprimé en m³/s, indiquant la quantité d'eau disponible à l'entrée de l'unité d'irrigation.

k : perméabilité ou conductivité hydraulique du sol.

- **Deuxième Condition**

Il est également nécessaire que :

$$d \leq k$$

où **d** représente la densité d'aspersion de l'arroseur, exprimée en hauteur d'eau par unité de temps.

2.5.4.2 Calcul des paramètres caractéristiques

1. Temps d'irrigation

Le temps d'irrigation (T) est calculé avec la relation suivante

$$T = \frac{\text{Dose d'irrigation}}{d}$$

34

2. Module d'irrigation

Le module d'irrigation (**m**) correspond au débit d'eau disponible à l'entrée de l'unité d'irrigation, exprimé en litres par seconde ou en m³/h. Il est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$\mathbf{m} = \mathbf{d} \times \mathbf{s} \times \mathbf{N} \quad 35$$

Où

d: densité d'aspersion de l'arroseur (m)

s: surface irriguée par chaque arroseur (m²)

N: nombre total d'arroseur en fonctionnement

3. Volume d'eau d'irrigation

Le volume d'eau d'irrigation (**V**) représente la quantité totale d'eau nécessaire pour fournir l'intégralité de la dose d'irrigation prévue. Il est calculé à l'aide des relations suivantes :

$$\mathbf{V} = \mathbf{m} \times \mathbf{T} \quad 36$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{D} \times \mathbf{S} \quad 37$$

Où

V: volume total d'eau en m³

m: module d'irrigation (m³/h)

T: Temps d'irrigation (heure)

D: dose d'irrigation (m)

S : surface de l'unité parcellaire d'irrigation

2.5.4.3 Exemple d'application

Une culture maraîchère est irriguée par aspersion pendant une phase critique de 30 jours, avec des besoins en eau maximaux (ETM) de 140 mm, sa profondeur racinaire moyenne étant de 40 cm. La culture est plantée sur un sol léger, sur une superficie de 5 hectares. Les caractéristiques du sol sont les suivantes :

- Densité apparente : 1,4 g/cm³
- Humidité pondérale à capacité au champ : 24 %
- Humidité pondérale au point de flétrissement permanent : 11 %

En supposant que l'humidité initial du sol se situe au point de flétrissement permanent, veuillez déterminer :

1. Dose pratique d'irrigation
2. Dose réelle maximale d'irrigation pouvant être appliquée sans nuire à la culture
3. Temps d'irrigation nécessaire pour fournir la dose réelle maximale avec l'arroseur ayant une densité d'aspersion de 5 mm/heure
4. Module d'irrigation si l'irrigation est effectuée sur toute la surface
5. Volume total d'eau nécessaire pour satisfaire l'ensemble des besoins en eau de la culture durant cette phase critique

Solution

1. Calcul de la dose pratique d'irrigation

Calcul de réserve utile (RU)

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) Da \times Z$$

$$RU = (0,24 - 0,11) \times 1,4 \times 400 = 72,8 \text{ mm}$$

Calcul de réserve facilement utilisable (RFU)

$$RFU = 2/3 RU = (2/3) 72,8 = 48,53 \text{ mm}$$

La dose pratique est définie comme étant égale à RFU est égale donc à 48,5 mm

2. Dose réelle maximale d'irrigation pouvant être appliquée sans nuire à la culture

Pour calculer la dose réelle maximale d'irrigation, on détermine la fréquence d'irrigation qui lui est associée (N) à l'aide de la relation suivante :

$$ND_p = ETM$$

$$N = \frac{ETM}{DP} = \frac{140}{48,5} = \mathbf{2,88}$$

Comme $N \geq 3$ et ce éviter d'avoir une dose d'irrigation supérieure à la EFU afin d'éviter la saturation du sol.

Avec $N = 3$, On obtient la dose maximale réelle maximale (Dr_{max})

$$Dr_{max} = \frac{ETM}{N} = \frac{140}{3} = \mathbf{46,67 \text{ mm}}$$

3. Temps d'irrigation nécessaire pour fournir la dose réelle maximale (T) avec l'arroseur ayant une densité d'aspersion de 5 mm/heure.

Soit d = densité d'aspersion de l'arroseur = 5 mm/h

$$T = \frac{Dr \text{ max}}{d} = \frac{46.67}{5} = 9.33 \text{ heures}$$

4. Module d'irrigation si l'irrigation est effectuée sur toute la surface (m)

Soit $d = 5 \text{ mm/h} = 0.005 \text{ m/h}$

$$m = d \times \text{surface} = 0.005 \text{ m} \times 50000 \text{ m}^2 = \mathbf{250 \text{ m}^3}$$

5. Volume total d'eau nécessaire pour satisfaire l'ensemble des besoins en eau de la culture durant cette phase critique (V)

Soit $ETM = 140 \text{ mm} = 0,140 \text{ m}$

$$V = ETM \times \text{Surface} = 0,140 \times 50000 = \mathbf{7000 \text{ m}^3}$$

2.6 Micro-irrigation

2.6.1 Principe

La micro-irrigation, dont le goutte-à-goutte constitue la technique principale, inclut également d'autres méthodes complémentaires. Cette approche innovante permet d'appliquer de l'eau de manière ciblée directement aux racines des plantes, assurant ainsi un débit précis sur une surface restreinte

Les systèmes de micro-irrigation utilisent des tuyaux en plastique de petit diamètre pour distribuer efficacement l'eau directement aux zones racinaires des plantes. Cette méthode emploie divers dispositifs de diffusion, tels que des goutteurs, des diffuseurs et des buses calibrées, qui fonctionnent sous une pression d'environ 1 bar. Les débits de ces dispositifs varient considérablement, répondant à différents besoins d'irrigation.

Les goutteurs et les conduits perforés présentent généralement des débits variant de 1 à 8 l/h, ce qui permet une application précise et contrôlée de l'eau directement au niveau des racines des plantes. Cette capacité à répartir l'eau de manière ciblée favorise une irrigation efficace, en réduisant le gaspillage et en optimisant l'utilisation des ressources hydriques [11]. Cette méthode permet de maximiser l'efficacité de l'irrigation dans les systèmes agricoles modernes.

2.6.2 Avantages et inconvénients de l'irrigation goutte à goutte

A/ Avantages

1. L'efficacité de l'eau est excellente à cause des raisons suivantes :
 - Très faible évaporation de l'eau dans l'air
 - Les feuilles ne sont pas humidifiées
 - Une partie de la surface du sol seulement est irriguée, l'autre reste sèche
 - La croissance des mauvaises herbes est limitée, donc il y a réduction de la consommation parasitée de l'eau.
2. L'humidité du sol demeure constamment élevée, près de la capacité de rétention, ce qui facilite l'absorption de l'eau par les racines sans nécessiter d'efforts supplémentaires.
3. L'application de la fertigation, qui consiste à mélanger des engrais avec l'eau d'irrigation, optimise l'absorption des nutriments par les racines
4. Étant donné que l'air n'est pas saturé, cela contribue à diminuer la prolifération des insectes et des maladies cryptogamiques.
5. Le coût d'installation du système est moins élevé pour les cultures à grand espacement, telles que l'arboriculture fruitière.

B/ Inconvénients

1. L'obstruction des goutteurs, principalement causée par plusieurs facteurs : la présence de particules de sable, les dépôts d'argile et de limon, les réactions chimiques entraînant des précipitations, ainsi que le développement de micro-organismes.
2. L'accumulation de sels à la surface du sol, particulièrement dans les régions à faible pluviométrie où le lessivage naturel est insuffisant.
3. La difficulté de déterminer le volume minimal de sol à irriguer qui résulte de la variabilité des caractéristiques des sols agricoles.
4. Dans les régions exposées au vent, la surface du sol sèche devient une source importante de poussière, pouvant causer des dommages significatifs aux cultures environnantes.

2.6.3 Eléments d'un réseau d'irrigation goutte à goutte

Un réseau d'irrigation est constitué de plusieurs éléments clés qui assurent la distribution efficace de l'eau depuis la source jusqu'aux goutteurs. Les principaux composants sont décrits comme suit :

1. Source d'eau

La source d'eau est un élément fondamental dans tout système d'irrigation, car elle assure l'approvisionnement en eau nécessaire à la croissance des cultures. Les types de sources d'eau varient et incluent les réservoirs, qui stockent l'eau pour une utilisation ultérieure, les puits, qui puisent l'eau souterraine, et les rivières, qui offrent un flux constant d'eau. De plus, les systèmes de collecte des eaux de pluie représentent une solution durable en capturant les précipitations pour les réutiliser.

2. Station de pompage et installation de tête

- **Station de pompage**

La station de pompage joue un rôle crucial dans un système d'irrigation en augmentant la pression de l'eau afin de la faire circuler efficacement dans le réseau. Cette installation comprend des pompes, qui peuvent être électriques ou mécaniques, selon les besoins et les spécificités du système. Grâce à cette augmentation de pression, l'eau peut atteindre les différentes zones d'irrigation, garantissant ainsi un approvisionnement adéquat pour les cultures.

- **Unité de filtration**

L'unité de filtration est un élément essentiel du système d'irrigation, conçue pour assurer la propreté de l'eau avant sa distribution (Fig 12). Elle comprend plusieurs types de filtres, notamment le filtre à sable, qui élimine les particules plus grosses et les débris, garantissant ainsi une eau claire. En complément, le filtre à tamis capture les particules plus petites, assurant une filtration fine. Cette filtration est cruciale, car elle permet d'éviter l'obstruction des goutteurs, garantissant ainsi un débit uniforme d'eau vers les plantes. Ensemble, ces filtres contribuent à maintenir l'efficacité du système d'irrigation et à protéger les équipements des dommages causés par les impuretés.



Fig 12: Dispositif de filtration en tête du réseau

- **Mélangeurs d'engrais**

Les mélangeurs d'engrais sont des dispositifs clés dans un système d'irrigation, permettant d'incorporer des engrais solubles dans l'eau pour la fertigation. Ils assurent une distribution homogène des nutriments, garantissant que les plantes reçoivent les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance, tels que l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium, le soufre, ainsi que des micronutriments comme le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre et le bore et autre.

- **Vanne de contrôle et débitmètre**

Une vanne de contrôle est généralement placée avant le manomètre et le débitmètre dans un système d'irrigation. Cette vanne permet de modifier le débit en l'ouvrant ou en la fermant, afin d'ajuster la pression de l'eau mesurée par le manomètre. Le débitmètre, quant à lui, permet de surveiller le volume d'eau circulant dans le système. Ensemble, ces dispositifs assurent que la pression souhaitée est maintenue, garantissant ainsi un fonctionnement optimal du système et une distribution uniforme de l'eau aux cultures.

- **Manomètre**

Le manomètre est un instrument essentiel qui mesure la pression de l'eau dans le système d'irrigation. Il permet de régler et de surveiller la pression, garantissant ainsi un fonctionnement optimal du système. Grâce à cette mesure, il est possible d'ajuster les paramètres pour assurer une distribution uniforme de l'eau aux cultures.

3. Canalisations principales

Les canalisations principales, composées de tuyaux de grand diamètre, jouent un rôle crucial dans le transport de l'eau depuis la source vers les différentes zones d'irrigation.

4. Porte-rampes

Les porte-rampes jouent un rôle essentiel dans la distribution de l'eau en irrigation goutte à goutte. Ils constituent un système de tuyaux de diamètre moyen qui permet de transférer l'eau des canalisations principales vers des zones spécifiques ou des secteurs d'irrigation ciblés. Sur ces porte-rampes, sont placées des rampes, également appelées gaines.

5. Rampes

Les rampes, ou gaines, sont des éléments clés du système d'irrigation goutte à goutte. Elles sont généralement fabriquées en plastique durable, résistant aux UV et aux produits chimiques. Cela garantit leur longévité et leur efficacité. Elles peuvent être perforées ou bien comporter des goutteurs intégrés à intervalles réguliers, selon les besoins d'irrigation des cultures.

6. Goutteurs

Les goutteurs sont des dispositifs essentiels dans les systèmes d'irrigation goutte à goutte. Leur rôle principal est de fournir de l'eau directement aux racines des plantes de manière précise et contrôlée.

Types de Goutteurs

- **Goutteur turbulent**

Un goutteur turbulent est un dispositif d'irrigation dont le débit d'eau varie en fonction de la pression (Fig 13). Lorsque la pression augmente, le débit s'accroît, et il diminue lorsque la pression baisse. Ce type de goutteur est idéal pour les cultures qui ne nécessitent pas une distribution d'eau parfaitement uniforme. Il est utilisé dans des parcelles plates, lorsque la

longueur des lignes d'égouttement reste en dessous des limites recommandées par le fabricant. Cependant, même dans ces conditions, il existe toujours une différence de débit entre les premiers goutteurs de chaque ligne et les derniers, ces derniers recevant moins de pression.



Fig 13: Goutteurs turbulents

- **Goutteur auto-régulant**

Un goutteur auto-régulant est équipé d'une membrane interne qui ajuste le débit d'eau en fonction de la pression reçue, permettant ainsi de maintenir un débit constant dans une plage de pressions (Fig 14). Cela améliore l'uniformité de l'irrigation.

Le goutteur anti-drainage est une variante de ce type de goutteur. Il possède une membrane qui ferme la sortie d'eau lorsque la pression descend en dessous d'un certain seuil. Cela empêche l'eau contenue dans le réseau de canalisations de s'écouler après l'irrigation, évitant ainsi que les zones basses d'une plantation reçoivent plus d'eau que le reste.

Le goutteur anti-siphon est une autre version du goutteur auto-régulant. Son mécanisme interne fonctionne comme un clapet anti-retour, empêchant l'eau de s'écouler dans la direction opposée au flux normal du goutteur.



Fig 14 Goutteurs auto-régulants

Parmi les goutteurs turbulents et auto-régulants, on trouve les goutteurs intégrés, qui sont des dispositifs d'irrigation intégrés directement dans les tuyaux d'égouttement (Fig 15)



Fig 15: Goutteurs intégrés

7. Accessoires divers

Les accessoires d'irrigation, tels que les connecteurs, coudes et tés, sont essentiels pour assembler et adapter les réseaux d'irrigation. Les connecteurs relient les tuyaux de manière étanche, tandis que les coudes permettent de changer la direction des tuyaux pour s'adapter au terrain. Les tés, quant à eux, créent des embranchements pour répartir l'eau vers plusieurs lignes.

Composantes du système d'irrigation goutte à goutte

Les différentes composantes du système d'irrigation goutte à goutte, de l'amont à l'aval, sont illustrées dans la Fig 16 ci-dessous:

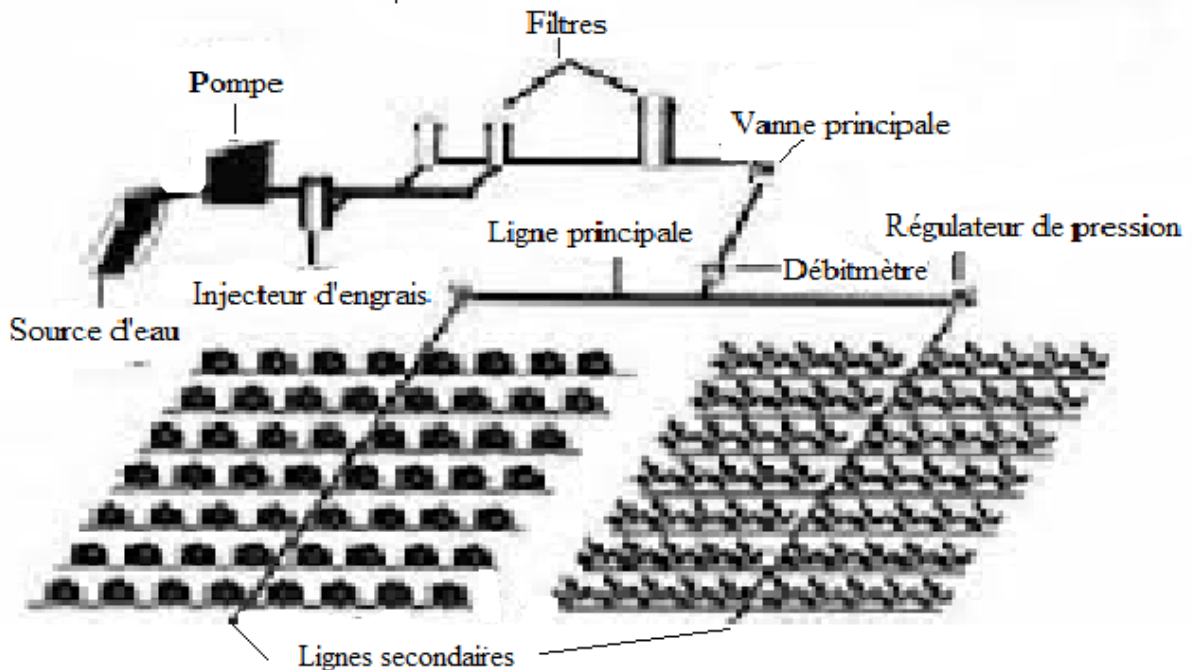


Fig 16: Composantes de base du système d'irrigation goutte à goutte

2.6.4 Théorie de l'irrigation goutte à goutte

2.6.4.1 Uniformité de l'irrigation

Le coefficient d'uniformité (CU) constitue un indicateur clé pour apprécier l'efficacité d'un système d'irrigation goutte à goutte. Il évalue la distribution de l'eau sur l'ensemble des goutteurs du réseau, fournissant ainsi une mesure précise de la manière dont l'eau est répartie entre les différentes zones de culture. Grâce à cette évaluation, il devient possible de déterminer si chaque plante reçoit la quantité d'eau prévue pour son développement optimal.

Un CU élevé indique une distribution homogène, essentielle pour garantir que toutes les plantes bénéficient des mêmes conditions d'humidité, ce qui favorise une croissance uniforme et une meilleure productivité. À l'inverse, un CU faible peut signaler des disparités dans l'approvisionnement en eau, pouvant entraîner des zones sèches ou trop arrosées, nuisibles à la santé des cultures.

Il existe plusieurs formules pour calculer le coefficient d'uniformité. Parmi elles, nous présentons ici celle de Keller (1974), qui repose sur le rapport entre le débit minimum d'un groupe de goutteurs et le débit moyen de la ligne d'irrigation. Elle est élaborée en testant un échantillon aléatoire de goutteurs et en mesurant leurs débits pour déterminer l'uniformité du système d'irrigation comme suit:

$$CU = \left(1 - U + U \times \frac{Q_i}{Q_m} \right) \frac{Q_i}{Q_m} \quad 38$$

Sachant que :

Qi: débit moyen des goutteurs dont le débit individuel est dépassé par 75 % des goutteurs

Qm: débit moyen de l'ensemble des goutteurs testés

U: fonction empirique du nombre de goutteur (n) par plante, comme indiqué dans le tableau 3 ci-dessous

Tableau 3 : Fonction empirique en fonction du nombre de goutteur par plante

n	1	2	3	4	6	8
U	1	0,71	0,58	0,50	0,41	0,35

En pratique, lorsque des produits sont fabriqués avec soin, accompagnés d'une filtration de haute qualité et d'une topographie uniforme, le coefficient d'uniformité peut atteindre des valeurs proches de 0,9. Cela indique une distribution de l'eau très homogène, essentielle pour assurer une irrigation efficace et optimale des cultures. Un CU élevé dans de telles conditions témoigne non seulement de la performance du système d'irrigation, mais aussi de l'importance de la qualité des matériaux et de la conception dans l'atteinte d'une distribution uniforme de l'eau.

2.6.4.2 Dose d'irrigation

La dose d'irrigation théorique, initialement calculée en fonction des besoins en eau de la culture et du déficit hydrique, subit deux ajustements simultanés. Il est essentiel d'optimiser la quantité d'eau appliquée pour garantir non seulement une répartition homogène, mais aussi pour minimiser l'accumulation de sels dans le sol, ce qui est crucial pour la santé des plantes et la durabilité du système d'irrigation. Ces corrections, qui prennent en compte l'uniformité de l'irrigation et le phénomène de lessivage des sels, apparaissent dans la formule suivante [12].

$$\text{Dose} = \frac{\text{Dose théorique}}{0,9 \times \text{CU}}$$

39

0,9: Coefficient prend en compte un lessivage moyen de 10 %. Cela signifie qu'il est nécessaire d'augmenter la dose d'irrigation théorique de 10 %. En d'autres termes, cette augmentation permet de s'assurer que l'eau appliquée non seulement satisfait les besoins en eau de la culture, mais contribue également à éliminer les sels indésirables du sol.

CU : coefficient d'uniformité qui permet d'ajuster l'augmentation du volume d'eau fourni aux goutteurs qui n'ont pas atteint le volume d'irrigation prévu.

2.6.4.3 Durée d'irrigation

La durée d'irrigation en heures est déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Durée} = \frac{\text{Dose} \times \text{E} \times \text{L}}{q}$$
 40

Où

La dose d'irrigation est exprimée en mm,

E: Ecartement entre les goutteurs sur la même ligne en m

L: Distance entre les lignes en m,

q: débit moyen par goutteur en litre par heure.

2.6.4.4 Exemple d'application

Déterminez la dose réelle d'irrigation et sa durée pour une culture de pomme de terre irriguée par un système de goutte à goutte, en tenant compte des ajustements de Keller et Karmeli concernant l'uniformité de l'irrigation et le lessivage des sels indésirables, sachant que :

- Les goutteurs sont espacés de 35 cm, avec un seul goutteur par plante
- Les rangées de pommes de terre sont espacées de 75 cm
- Le débit moyen d'un goutteur est de 1,5 litres par heure
- La dose d'irrigation théorique est de 40 mm ?
- Le coefficient d'uniformité de l'irrigation est de 0,87

Solution

$$\text{Dose} = \frac{\text{Dose théorique}}{0,9 \times \text{CU}} = \frac{40}{0,9 \times 0,87} = 51,08 \text{ mm}$$

$$\text{Durée d'irrigation} = \frac{\text{Dose} \times E \times L}{q} = \frac{51,08 \times 0,35 \times 0,90}{1,5} = 10,73 \text{ heures}$$

Partie 2 : Drainage

Chapitre 1 : Excès d'eau et techniques d'assainissement

Introduction

L'excès d'eau dans les sols agricoles constitue un enjeu majeur pour la production végétale. Ce phénomène, souvent sous-estimé, peut avoir des effets dévastateurs sur la santé des plantes, la qualité du sol et, par conséquent, sur la rentabilité des exploitations agricoles. Dans ce chapitre, nous explorerons les diverses conséquences des excès d'eau, tant sur les cultures que sur l'environnement agricole dans son ensemble. Nous aborderons également les origines de ce surplus hydrique et présenterons les techniques d'assainissement disponibles pour y remédier. Une gestion adéquate des eaux est essentielle pour garantir la durabilité des systèmes agricoles, en préservant la fertilité des sols et en optimisant les rendements.

1.1 Effets des excès d'eau sur les plantes et le sol

L'eau est un élément essentiel pour le développement des plantes, jouant un rôle crucial dans leur croissance et leur métabolisme. Cependant, un excès d'eau peut entraîner des conséquences néfastes sur la santé des plantes et la qualité du sol. Les principaux effets négatifs de ces excès d'eau sur la plante et le sol sont :

1- L'excès d'eau peut gravement perturber l'activité respiratoire des racines, provoquant une anoxie, c'est-à-dire un manque d'oxygène essentiel. Lorsque le sol est saturé, il devient imperméable à l'air, ce qui entraîne une asphyxie des plantes due à une circulation d'air insuffisante. Cette situation limite non seulement l'absorption des nutriments, mais compromet également le métabolisme global des végétaux, rendant ainsi leur croissance plus difficile et les rendant plus vulnérables aux maladies.

2- L'excès d'eau provoque une baisse significative de la température du sol en raison de l'évaporation intense de l'eau, créant ainsi un environnement humide. Cette diminution de la

température entraîne un retard considérable dans la croissance des plantes, pouvant aller jusqu'à plusieurs semaines. Ce phénomène peut avoir des répercussions notables sur la santé des cultures et leur développement, affectant ainsi la productivité agricole.

3- Les sols constamment humides entravent le développement des racines en profondeur pour la plupart des cultures, à l'exception de certaines espèces comme le riz et le palmier dattier. Un enracinement peu profond expose les plantes à un risque accru de parasites et de maladies fongiques, qui se propagent plus facilement dans les couches superficielles du sol. De plus, cette superficialité dans le système racinaire limite la capacité des plantes à exploiter les réserves d'eau disponibles en profondeur, entraînant ainsi une réduction significative de l'eau accessible lors des pluies ou des irrigations. Cela peut compromettre la santé des cultures et leur résilience face aux périodes de sécheresse.

4- Les sols humides présentent des difficultés notables lors du labourage en raison de la forte résistance de leur consistance pâteuse. Cela entraîne une augmentation des dépenses énergétiques nécessaires, estimées à environ 25 à 30 % de plus que celles requises pour des sols normalement humides. De surcroît, labourer un sol dans un état excessivement humide peut conduire à la formation de mottes indurées qui deviennent particulièrement problématiques durant les périodes sèches qui suivent. Ces mottes, devenues pratiquement impénétrables, entravent le développement des racines et limitent l'accès des plantes à l'eau et aux nutriments essentiels, compromettant ainsi leur croissance et leur santé.

1.2 Effets des excès d'eau sur les cultures et les exploitations

Les excès d'eau peuvent avoir plusieurs effets néfastes supplémentaires sur les cultures et les exploitations :

- 1. Asphyxie des racines** : Une saturation excessive du sol peut priver les racines d'oxygène, entraînant leur déclin et augmentant la vulnérabilité des plantes aux maladies.
- 2. Nutriments lessivés** : L'excès d'eau peut entraîner le lessivage des nutriments essentiels, réduisant la fertilité du sol et impactant la croissance des plantes.
- 3. Diminution de la biodiversité du sol** : Les sols trop humides peuvent perturber l'équilibre des organismes du sol, nuisant à la biodiversité et à la santé globale de l'écosystème.
- 4. Prolifération de maladies** : Les conditions humides favorisent le développement de maladies fongiques et bactériennes, ce qui peut entraîner des pertes de récoltes importantes.
- 5. Risque d'érosion** : L'excès d'eau peut favoriser l'érosion du sol, entraînant une perte de terre arable et dégradant la structure du sol.

- 6. Difficultés de récolte :** Les conditions de sol détrempé rendent la récolte plus complexe, augmentant les coûts et le temps nécessaire pour récolter les cultures.
- 7. Impact économique :** Les pertes de rendement et les coûts supplémentaires associés à la gestion des sols humides peuvent affecter la viabilité économique des exploitations agricoles.

1.3 Origine des excès d'eau

Les causes des excès d'eau dans les sols agricoles sont multiples et variées. Une compréhension précise de ces origines est essentielle pour sélectionner les solutions les plus appropriées pour chaque situation. Parmi ces causes, on trouve les précipitations excessives, l'irrigation inappropriée, le drainage insuffisant et les caractéristiques géologiques du terrain.

En identifiant les facteurs spécifiques contribuant à l'humidité excessive, les agriculteurs peuvent mettre en œuvre des stratégies adaptées, telles que l'amélioration du drainage, l'ajustement des pratiques d'irrigation ou l'adoption de cultures mieux adaptées aux conditions hydrique. Les principales origines de ces excès d'eau sont :

1- Pluviométrie

Des pluies intenses pendant quelques jours, dépassant la capacité d'infiltration des sols, peuvent entraîner une saturation inappropriée du sol. De plus, dans les régions semi-arides et arides, des averses soudaines peuvent provoquer une remontée du niveau de la nappe phréatique, atteignant les racines des plantes.

2- Ruissellement superficielle

Les vallées, les plaines et les dépressions peuvent être sujettes à des inondations causées par les eaux de pluie qui s'écoulent des zones amont des bassins versants. Lors de la conception d'un projet de recherche, il est crucial de prendre en compte ces importantes lames d'eau. Cela implique de déterminer précisément les débits d'eau à évacuer pour éviter tout risque d'inondation et garantir la sécurité et l'efficacité du projet. Une analyse approfondie des conditions hydrologiques locales est donc essentielle pour anticiper les impacts potentiels des précipitations sur l'environnement et les infrastructures.

3-Ecoulement souterrain

Dans certaines régions montagneuses ou accidentées, des sources d'eau peuvent émerger de nappes profondes et s'écouler vers les terres agricoles. Cependant, lorsque ces eaux deviennent excessives, elles peuvent saturer le sol, entraînant des problèmes d'engorgement.

4-Irrigation

Les eaux d'irrigation mal maîtrisées peuvent entraîner une élévation du niveau de la nappe phréatique, créant des conditions insupportables pour les racines des plantes. Lorsque le niveau d'eau monte de manière excessive, cela peut provoquer un engorgement des sols. De plus, la percolation des canaux d'alimentation peut aggraver cette situation, en contribuant à une saturation excessive des sols. Cela souligne l'importance d'une gestion rigoureuse des systèmes d'irrigation, afin de garantir un apport hydrique équilibré qui préserve la santé des cultures et la fertilité des terres agricoles.

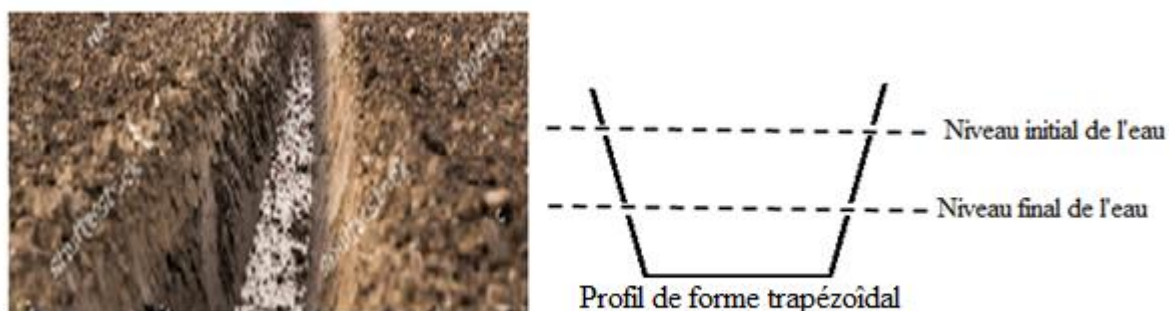
1.4 Méthodes d'assainissement

L'assainissement et le drainage agricole sont des pratiques essentielles pour maintenir la santé des sols et optimiser la productivité des cultures. Ainsi, il est crucial d'adopter des méthodes efficaces pour évacuer ces eaux en excès. Dans ce contexte, nous examinerons les différentes techniques de drainage agricole, leurs principes de fonctionnement et leur impact sur la durabilité des systèmes de culture. Les méthodes, qui ont évolué au fil du temps sont comme suit:

1.4.1 Drainage par fossés

1.4.1.1 Fossés ouverts

Le drainage par fossés ouverts est réalisé comme illustré dans la Fig 17 ci-dessous.



Fi 17: Fossés ouverts

Cette technique de drainage par fossés ouverts, particulièrement adaptée au drainage superficiel, est efficace. Cependant, elle présente certains inconvénients significatifs, notamment:

1. **Perte de surface utile** : L'aménagement de fossés réduit la superficie exploitable du terrain, limitant ainsi les possibilités agricoles.
2. **Entrave à la circulation des engins** : Les fossés peuvent gêner le passage des machines agricoles, ce qui complique la mécanisation des travaux et peut entraîner des retards dans les opérations.
3. **Entretien des talus** : Les pentes des fossés sont sujettes aux érosions et aux chutes, nécessitant une attention régulière pour garantir leur sécurité et leur fonctionnalité.

Ces facteurs rendent le drainage par fossé ouvert moins optimal dans certaines situations.

1.4.1.2 Fossés couverts

Le drainage par fossés couverts, comme illustré dans la Fig 18 ci-dessous, repose sur le principe de la création d'un fond drainant constitué de pierres cassées. Ce fond agit comme une pseudo-conduite souterraine, permettant de diriger efficacement les eaux de drainage.

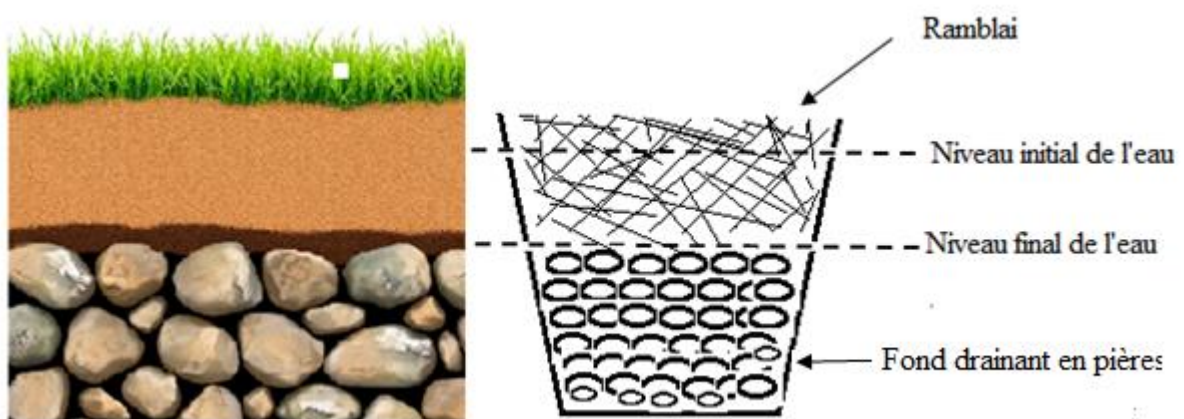


Fig 18: Fossés couverts

Le drainage par fossés couverts, en comparaison avec la technique précédente, offre à la fois des avantages et des inconvénients.

Avantages :

1. **Préservation de la surface agricole** : Cette méthode permet de maintenir l'intégralité des terres cultivables, évitant ainsi toute perte de surface utile.
2. **Facilitation de la mécanisation** : Le passage des machines agricoles pour les diverses opérations n'est pas entravé, ce qui optimise l'efficacité des travaux sur le terrain.

Inconvénients:

- 1. Risque de colmatage :** Le fond des fossés peut se boucher, réduisant ainsi l'efficacité du drainage et nécessitant des interventions régulières.
- 2. Entretien complexe :** La maintenance des fossés, particulièrement en cas de colmatage, peut s'avérer difficile et requérir des efforts supplémentaires.

1.4.2 Drainage par tuyaux enterrés

Le drainage agricole par tuyaux enterrés consiste en l'installation de tuyaux perméables à des profondeurs spécifiques, généralement entre 1 et 2 mètres. Ces tuyaux, souvent en chlorure de polyvinyle (PVC), sont conçus avec des perforations permettant à l'eau de s'infiltrer de l'extérieur.

Historiquement, les tuyaux étaient fabriqués en poterie (terre cuite), composés de segments d'environ 30 cm de long, dotés d'embouts mâles et femelles. Cette conception facilitait la jonction et l'entrée de l'eau, garantissant une évacuation efficace des excès d'eau du sol.

Aujourd'hui, les tuyaux en PVC ont largement remplacé ceux en terre cuite en raison de leur durabilité, légèreté et résistance à la décomposition. Ils représentent une solution moderne et efficace pour la gestion de l'eau en agriculture.

Cette méthode s'inscrit dans le cadre plus large du drainage souterrain, qui sera exploré en profondeur dans le chapitre 2. Pour une compréhension approfondie des techniques de pose et des défis associés, voir le chapitre 2.

1.4.3 Drainages spéciaux

1.4.3.1 Travail du sol (sous-solage)

Le drainage par labour profond, également connu sous le nom de sous-solage, consiste à travailler le sol à une profondeur d'environ de 60 cm. Cette technique permet de modifier la structure du sol, ce qui entraîne une augmentation significative de sa perméabilité. En améliorant la circulation de l'eau à travers le sol, le sous-solage favorise un drainage naturel plus efficace, réduisant ainsi le risque de saturation et améliorant les conditions de croissance des plantes. Cette méthode est particulièrement bénéfique dans les sols compacts, où la circulation de l'eau est souvent entravée, permettant ainsi une meilleure aération et une plus grande disponibilité des nutriments pour les cultures.

1.4.3.2 Taupage

Le taupage est une méthode de drainage qui consiste à créer des pseudo-conduites souterraines à l'aide d'une charrue taupe, généralement dans un sol humide. Cette technique permet d'améliorer le drainage en facilitant l'évacuation des eaux excédentaires.

La profondeur atteinte lors du taupage est généralement modeste, en raison des forces importantes nécessaires pour manipuler le sol. Le terme "taupage" fait référence à la ressemblance des conduites formées avec les galeries creusées par les taupes, des animaux de la famille des souris, connus pour leur capacité à fouiller le sol.

Cette méthode est particulièrement efficace dans les zones où un drainage naturel est nécessaire pour prévenir l'accumulation d'eau, favorisant ainsi des conditions de culture optimales et la santé des racines des plantes. En outre, le taupage contribue à la structuration du sol, améliorant sa capacité à retenir l'eau et à aérer les racines.

Il est important de noter que ces pseudo-conduites sont susceptibles de se rompre sous le poids des machines agricoles, ce qui limite la durabilité de cette technique. Bien que le taupage soit efficace pour prévenir l'accumulation d'eau et favoriser des conditions de culture optimales, sa longévité peut être compromise par l'utilisation d'équipements lourds.

Chapitre 2 : Drainage souterrain

2.1 Principe

Le principe fondamental du drainage souterrain repose sur l'installation d'un réseau de conduites enterrées, conçu pour évacuer artificiellement les eaux excédentaires d'un sol agricole. Cette évacuation a pour but de réduire le niveau de la nappe phréatique à une profondeur optimale. Cela garantit un environnement propice à la croissance des racines des plantes, en évitant les risques d'asphyxie, notamment pendant les mois d'hiver et les périodes de fortes pluies.

2.2 Tuyaux de drainage

2.2.1 Types de tuyaux

Le Document FAO sur l'Irrigation et le Drainage n° 60 présente des informations détaillées concernant les matériaux utilisés pour le drainage souterrain [13]. Les tuyaux en plastique ondulé, dotés de perforations appropriées, sont souvent privilégiés comme drains de champ en raison de leur flexibilité, de leur légèreté et de leur facilité d'installation mécanique, même à

des profondeurs de 2,5 m et plus. En Europe, le chlorure de polyvinyle (PVC) est couramment employé, tandis qu'en Amérique du Nord, les tuyaux en polyéthylène (PE) sont plus répandus, bien que les deux types soient techniquement compatibles. Bien que le matériau PE présente une résistance inférieure à la pression du sol par rapport au PVC et soit susceptible de se déformer à des températures élevées, il offre une meilleure résistance aux radiations ultraviolettes pendant le stockage et la manipulation, et il est moins fragile à des températures inférieures à 3 °C. Toutefois, le choix se fait généralement en fonction de la disponibilité et du coût [14].

Les tuyaux de drainage se divisent en trois types principaux : lisses, annelés et cannelés.

Tuyaux Lisses : Ces tuyaux possèdent une surface intérieure lisse, sans imperfections, ce qui réduit la friction et facilite l'écoulement de l'eau. Généralement fabriqués en PVC ou en plastique, ils offrent un excellent flux d'eau grâce à leur surface lisse. Toutefois, ils sont moins résistants à la pression du sol comparés aux types annelés. Parmi leurs avantages, on note un faible risque de colmatage, ce qui les rend idéaux pour des sols moins chargés en particules solides, ainsi qu'une installation facile et rapide. En revanche, leur durabilité est limitée sous une forte pression du sol, et ils peuvent être sensibles à la déformation dans des terrains très instables.

Tuyaux Annelés : Ces tuyaux se caractérisent par une surface extérieure ondulée avec des anneaux prononcés. Souvent en PVC, ils sont légers et flexibles. Leur écoulement est bon, bien qu'il soit légèrement inférieur à celui des tuyaux lisses. Ils présentent une bonne résistance à la pression du sol en raison de leur conception renforcée. Parmi leurs avantages, on trouve une flexibilité accrue qui facilite l'installation dans des terrains irréguliers, ainsi qu'une durabilité améliorée contre la déformation. Cependant, ils sont moins efficaces pour la filtration des particules solides, ce qui peut conduire à un colmatage si le sol est argileux.

Tuyaux Cannelés : Ces tuyaux se distinguent par une surface avec des rainures ou des cannelures sur la surface externe, ce qui les rends plus flexibles et e résistant à la compression, bien que leur conception puisse être plus délicate lors de l'installation. Généralement, ils sont en PVC. Les avantages des tuyaux cannelés incluent une excellente capacité d'infiltration, ce qui réduit le risque de colmatage, rendant ces tuyaux idéaux pour des sols chargés en particules solides. Toutefois, ils sont souvent plus coûteux à produire et à installer, et les rainures peuvent être endommagées si elles ne sont pas manipulées avec soin.

Les principales caractéristiques des tuyaux sont récapitulées dans le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Récapitulatif des principales caractéristiques des tuyaux

Type de Tuyau	Surface	Écoulement	Résistance	Avantages	Inconvénients
Lisse	Lisse	Excellent	Moins résistant	Faible risque de colmatage	Sensible à la déformation
Annelé	Ondulée (prononcée)	Bon	Bonne	Flexible et durable	Moins efficace pour la filtration
Cannelé	Rainurée	Bon	Bonne	Excellente filtration	Plus coûteux et délicat

2.2.2 Diamètres des tuyaux

Le choix des diamètres des tuyaux dans un réseau de drainage repose sur une multitude de facteurs interconnectés. Ce choix est principalement déterminé par le débit d'eau à évacuer, calculé lors de l'étude technique approfondie du système de drainage. Ce débit est influencé par des éléments variés tels que la pluviométrie, la nature du sol, la pente du terrain, ainsi que la superficie de la parcelle à drainer. En règle générale, les diamètres des tuyaux et des collecteurs augmentent de l'amont vers l'aval selon le type de drain utilisé. Les drains tertiaires, également appelés drains de champ, possèdent des diamètres relativement modestes, se situant typiquement entre 50 et 80 mm. Cependant, dans certaines situations particulières, il peut être nécessaire de choisir des diamètres plus importants, pouvant atteindre jusqu'à 100 mm, afin de répondre à des besoins spécifiques.

Les drains secondaires jouent un rôle essentiel en regroupant l'eau provenant de plusieurs drains tertiaires, ce qui facilite une gestion plus efficace des eaux. Enfin, les drains primaires, ou collecteurs principaux, sont chargés de transporter l'ensemble de cette eau vers un exutoire, garantissant ainsi une évacuation fluide et sécurisée.

2.2.3 Débit à évacuer par les drains tertiaires

Le débit à évacuer par le drain tertiaire correspond au produit du débit caractéristique de dimensionnement du réseau en régime permanent et de la surface drainée par chaque drain. En d'autres termes, pour chaque drain, le volume d'eau à traiter est déterminé en multipliant le débit standard requis pour assurer un fonctionnement optimal du système par la surface spécifique qu'il est chargé de drainer.

Remarque : Il est clair que l'écoulement dans les drains ne peut se produire en charge, car le débit de dimensionnement n'est atteint qu'à l'extrémité du drain. En conséquence, la section mouillée du drain est multipliée par un facteur (f) inférieur à 1, ce qui est approprié pour un écoulement libre. Ainsi, la section mouillée "S" soit de préférence déterminée comme suit :

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot f \quad 41$$

En pratique, le débit de dimensionnement n'est atteint qu'à l'extrémité du drain, où la section est complètement pleine. Dans ce cas, il est recommandé d'appliquer $f = 1$. Cependant, si un risque de colmatage partiel de la section d'écoulement est à prévoir, il est conseillé d'adopter une valeur de f comprise entre 0,71 et 0,75 pour plus de sécurité.

Il existe une formule spécifique utilisée par les Américains pour calculer le débit maximal (Q_{\max}) à évacuer par le drain, qui s'exprime comme suit :

$$Q_m = 21.82 \times D_{int}^{8/3} \times I(^{\circ}/^{\circ\circ})^{1/2} \quad 42$$

Où

Dint : Diamètre intérieur du drain

I : pente du terrain exprimée en pour mille

2.2.4 Exemple d'application

Si on considère un système de drainage où l'écartement entre les drains est de 40 mètres et la longueur de chaque drain est de 200 mètres, avec un débit caractéristique de dimensionnement du réseau en régime permanent de 5 mm/jour. Calculez le débit à évacuer par un drain tertiaire en tenant compte de la surface qu'il doit drainer, appelé débit de dimensionnement

Solution

Avec :

Ecartement entre les drains $E = 40$ m,

Longueur de chaque drain $L = 200$ m

Débit caractéristique en régime permanent $q_c = 5$ mm/jour

Le débit à évacuer par un drain tertiaire ou débit de dimensionnement (Q_d)

$$Qd = E \times L \times qc = 40 \times 200 \times 0.005 = 40 \text{ m}^3/\text{jour}$$

$$Qd = 0,46 \text{ l/s}$$

2.2.5 Paramètres de dimensionnement

Les études des paramètres de dimensionnement du drainage en Europe révèlent des différences significatives selon les pays. Ces variations sont mises en lumière à travers la présentation des méthodes de calcul de l'écartement des drains et de la capacité de transport des tuyaux. Le tableau 5 ci-dessous résume ces informations, illustrant les spécificités de chaque région en matière de gestion de l'eau [15].

Tableau 5: Paramètres de dimensionnement du drainage dans différents pays européens

Pays	Calcul écartement des drains	Capacité de transport des tuyaux
France	Régime transitoire : de 1 à 5 jours de rabattement de 0,2 à 0,45 cm après la pluie. Écartement 8 à 30 m.	Débit de projet de 1 à 2 l/s/ha (jusqu'à 5 l/s/ha en montagne). Tuyaux trois quart pleins.
Allemagne	Régime permanent : profondeur d'équilibre de la nappe 0,6 m.	Débit de projet de 0,8 à 2 l/s/ha. Écoulement à section pleine.
Irlande	Régime permanent : profondeur d'équilibre de la nappe de 0,4 à 0,6 m. Jusqu'à 50 m d'écartement.	Débit de projet de 1,2 à 1,7 l/s/ha.
Pays-Bas	Régime permanent : profondeur d'équilibre de la nappe de 0,3 à 0,5 m (jusque 0,7 m pour certaines cultures sensibles).	Débit de projet de 0,8 à 1,2 l/s/ha (jusque 3,5 l/s/ha pour les cultures sensibles). Écoulement à section pleine et partiellement en charge.

La conception du réseau dépend des caractéristiques pluviométriques de la région [16].

- En cas de pluies longues et fréquentes pendant la période critique (où le sol n'a pas le temps de s'assécher complètement entre deux épisodes pluvieux), on adopte une hypothèse de régime permanent plausible.
- Pour des pluies intenses et de courte durée, relativement espacées, une approche en régime variable est privilégié

Les écartements courants des drains, adoptés en fonction du type de sol, sont présentés dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6: Ecartements courant entre les drains

Type de sol	Ecartement (m)
Lourds ou compacts	10- 15
Fins	15- 20
Silto-sableux	15- 25
Sableux	20- 35

Interprétation des écartements entre les drains

1. Sol lourds ou compacts

Les sols lourds, souvent argileux, retiennent l'eau et sont plus susceptibles de s'engorger. Des écartements plus rapprochés (10-15 m) sont nécessaires pour assurer un drainage efficace et éviter l'accumulation d'eau.

2. Sol fins

Les sols fins, qui contiennent davantage de particules de limon, offrent une capacité de rétention d'eau modérée. Les écartements de 15 à 20 m permettent un bon drainage tout en maintenant une humidité suffisante pour les cultures.

3. Sol silto-sableux

Ce type de sol, mélangeant silt et sable, présente une bonne capacité d'infiltration. Les écartements plus larges (15-25 m) sont appropriés, car le sol évacue l'eau efficacement, réduisant ainsi le risque d'engorgement.

4. Sol sableux

Les sols sableux ont de grandes particules, ce qui favorise un excellent drainage. Les écartements les plus larges (20-35 m) sont justifiés, car l'eau s'infiltré rapidement, minimisant le besoin de drains rapprochés.

2.3 Machines de pose

La pose mécanique des drains s'effectue à l'aide d'une machine spécialisée appelée draineuse (ou trancheuse). Cette machine est montée sur un châssis équipé de deux chenilles, ce qui permet de minimiser le tassement du sol durant l'opération.

Fonctionnement de la draineuse

À l'arrière de la draineuse se trouve un bras articulé, muni d'un contre-sous-soleur. Cet élément est conçu pour pénétrer dans le sol et créer une saignée, dans laquelle le drain sera ultérieurement introduit. Le contre-sous-soleur peut atteindre des profondeurs allant jusqu'à 1,5 mètre, ce qui lui permet de s'adapter à divers types de terrain.

En termes de puissance, on distingue trois modèles de draineuses adaptés à des besoins spécifiques et à des conditions de terrain variées (Figs 19, 20 et 21).

1. Draineuses légères ou tractées

Ces draineuses, généralement tractées par un véhicule, sont idéales pour des projets de petite à moyenne envergure. Leur conception leur confère une grande maniabilité et flexibilité, ce qui les rend parfaitement adaptées aux terrains moins exigeants.

2. Draineuses automotrices de taille moyenne à grande

Les draineuses automotrices, de taille moyenne à grande, sont conçues pour des travaux de drainage plus intensifs. Elles s'adaptent à divers types de sols et sont capables d'effectuer des installations précises à des profondeurs variées, tout en gérant des exigences plus lourdes.

3. Modèles très puissants pour terrains difficiles ou gros Projets

Ces modèles sont spécialement conçus pour faire face à des conditions de sol difficiles, telles que des terrains compacts ou rocheux. Ils sont idéaux pour les grands chantiers d'infrastructure, où des performances élevées et une fiabilité accrue sont essentielles.



Fig 19 Draineuse portée avec enrouleur
Profondeur : 30 cm - 50 cm



Fig 20: Draineuse montée sur tracteur
Profondeur 2 m



Fig 21 Draineuse trancheuse

Installation du drain

Lorsque la draineuse avance à petite vitesse, le drain se glisse naturellement dans le caisson et se positionne dans le sol à la profondeur définie par l'étude préalable du projet. Cela garantit un placement précis et conforme aux spécifications techniques.

Pour optimiser l'installation, la draineuse peut être équipée d'un système de téléguidage par laser. Ce système aide à maintenir l'inclinaison adéquate des drains, assurant ainsi un drainage efficace. L'utilisation de la technologie laser permet d'obtenir une pente précise, essentielle pour le bon fonctionnement du système de drainage.

Avantages de la pose mécanique

La pose mécanique offre plusieurs avantages, notamment une rapidité d'exécution et une précision accrue dans le placement des drains. Cela permet d'améliorer l'efficacité de l'installation tout en réduisant les perturbations du sol environnant.

2.4 Risques de colmatage

Le risque de colmatage des tuyaux de drainage peut être attribué à trois principales sources :

1. Conditions d'installation du réseau

Les conditions lors de l'installation du réseau de drainage jouent un rôle crucial. Une mauvaise mise en place, comme un nivellement inadéquat, peut favoriser l'accumulation de débris et de sédiments à l'intérieur des tuyaux. Il est essentiel de porter une attention particulière à la préparation du sol et à la qualité des matériaux utilisés pour garantir un fonctionnement efficace du système.

2. Présence de dépôts

Le colmatage peut se manifester sous différentes formes, notamment :

- **Colmatage minéral** : Causé par l'accumulation de particules solides, comme des sables et des argiles.
- **Colmatage ferrique** : Résulte du dépôt d'hydroxyde de fer (ocre) dans les tuyaux, souvent lié à un phénomène d'ensablement. Ce dernier se produit en deux étapes :
 - **Étape primaire** : Survient lors de l'installation du réseau, après l'amorçage de l'écoulement.
 - **Étape secondaire** : Se produit après la destruction des particules de sol par le passage de l'eau.

L'ensablement dépend de plusieurs facteurs, notamment la texture du sol, le dimensionnement des drains et leur méthode d'installation. L'hydroxyde de fer s'associe à la matrice organique et à d'autres éléments minéraux comme l'aluminium, le soufre et le silicium, contribuant ainsi au colmatage des drains agricoles. L'activité des microorganismes catalyse également le dépôt de l'ocre.

3. Emplacement des drains par rapport à l'enracinement des arbres

Enfin, le colmatage racinaire se produit lorsque les terminaisons racinaires pénètrent dans les tuyaux à travers les perforations. Ce phénomène est particulièrement fréquent lorsque les drains sont situés à proximité des rangées d'arbres, où les racines peuvent facilement interagir avec le système de drainage.

Conclusion

En résumé, pour éviter le colmatage des tuyaux de drainage, il est crucial de prêter attention aux conditions d'installation, de surveiller les dépôts minéraux et ferriques, et de prendre en compte l'emplacement des drains par rapport aux racines des arbres. Une gestion proactive de ces facteurs contribuera à maintenir l'efficacité du système de drainage.

2.5 Disposition des drains

La disposition des drains et des collecteurs est étroitement liée à la topographie du terrain, notamment au tracé des courbes de niveau. Pour garantir une efficacité optimale dans la collecte des eaux, il est recommandé que les collecteurs soient installés perpendiculairement aux courbes de niveau. Cette orientation permet un drainage efficace des eaux de drainage.

De plus, les drains doivent être répartis de part et d'autre des collecteurs. Cette configuration stratégique assure une gestion optimale de l'eau, en facilitant son acheminement vers les collecteurs tout en minimisant les risques d'accumulation. La configuration des drains est influencée par la pente du terrain. Dans le cas de pentes faibles, les drains sont installés parallèlement et perpendiculairement aux collecteurs, comme illustré dans la Fig 22.

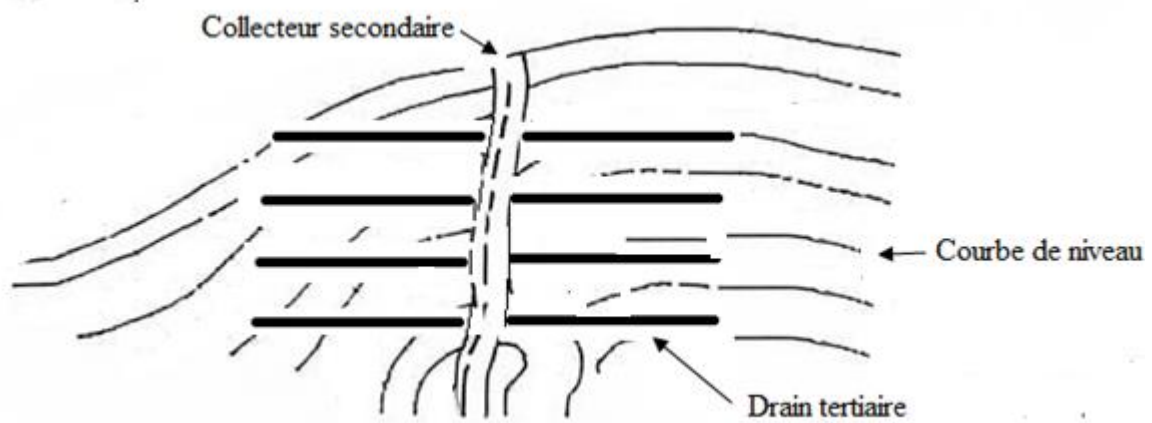


Fig 22 : Disposition des drains en parallèles

En revanche, pour les terrains à forte pente, il est préférable d'adopter une disposition en arête de poisson, comme illustré dans la Fig 23, ce qui optimise l'efficacité du drainage.

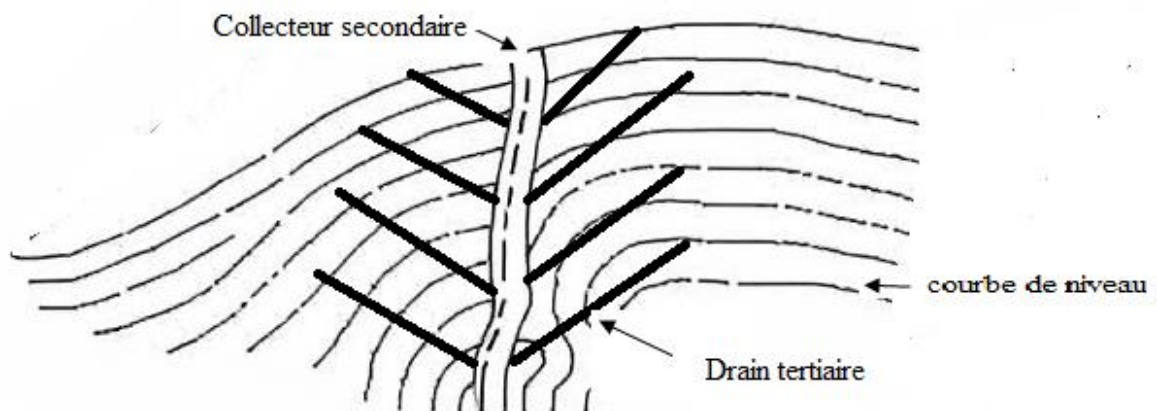


Fig 23: Disposition des drains tertiaires en arête de poisson

Chapitre 3 : Drainage de surface

3.1 Principes

Dans les régions où les précipitations sont particulièrement abondantes, il est courant de rencontrer des problèmes d'engorgement du sol, notamment dans ses couches superficielles. Ce phénomène peut engendrer des difficultés pour les cultures agricoles et exacerber l'érosion des sols. L'accumulation d'eau en surface favorise la formation de zones humides durables, souvent causées par des écoulements d'eau souterrains. Ces écoulements se produisent en raison de la présence de pseudo conduites naturelles, qui résultent des pratiques de préparation du sol.

Pour remédier à ces problèmes, le drainage agricole de surface s'avère être une solution efficace surtout s'il est associé au drainage souterrain. Cette approche intégrée permet non seulement de prévenir l'engorgement, mais aussi de réduire les risques d'érosion, contribuant ainsi à la durabilité des terres agricoles.

Le drainage de surface est fortement recommandé dans les sols présentant une très faible perméabilité, définie comme étant inférieure à 0,1 mètre par jour. Dans ces conditions, le drainage souterrain devient peu rentable en raison de la nécessité de rapprocher les drains tertiaires.

En effet, une densité élevée de drains à installer entraîne une augmentation substantielle des coûts d'investissement, rendant cette solution difficile à justifier sur le plan économique.

3.2 Modelé du terrain

1. Définition

Le modelé du terrain désigne l'aménagement du relief afin d'optimiser le drainage. Cela englobe la création de pentes, de canaux, de rigoles et de fossés qui dirigent l'eau vers des zones de collecte ou d'évacuation. En somme, il s'agit de configurations et d'aménagements du sol conçus pour faciliter l'évacuation et la gestion des eaux de pluie excédentaires à la surface.

2. Importance du Modelé du Terrain

Le modelé du terrain est essentiel pour la gestion de l'eau en agriculture. Il permet d'évacuer l'excès d'eau loin des zones cultivées, évitant ainsi l'engorgement et réduisant le risque d'inondation par un contrôle efficace du ruissellement. De plus, un bon aménagement favorise un sol bien aéré, améliorant ainsi la santé des racines et la croissance des plantes. Il contribue également à réduire la salinité, limitant l'accumulation de sels nuisibles aux cultures. En somme, un modelé adéquat est crucial pour garantir des rendements agricoles durables et de qualité.

3. Principes de conception du modelé du terrain

La conception du modelé du terrain repose sur plusieurs principes fondamentaux. Tout d'abord, la topographie joue un rôle clé : le terrain doit présenter une pente suffisante, généralement de 1 à 2 %, pour faciliter l'écoulement de l'eau. Il est également important d'identifier les dépressions, ces zones basses où l'eau peut s'accumuler, afin de les diriger vers des collecteurs appropriés.

Ensuite, des systèmes de drainage efficaces sont essentiels. Cela inclut la création de canaux de drainage qui orientent l'eau sur la surface et l'utilisation de fossés pour collecter et évacuer l'eau vers des zones de drainage. Ces éléments permettent de garantir un drainage optimal et une gestion adéquate des eaux de pluie excédentaires.

4. Techniques et matériaux utilisés

Pour le modelé du terrain, diverses techniques et matériaux sont employés. Parmi les matériaux naturels, la terre, le gravier et la pierre sont couramment utilisés pour la construction de canaux et de fossés. Ces matériaux permettent de créer des infrastructures durables et efficaces.

En outre, l'installation de systèmes de collecte est essentielle pour diriger l'eau vers des zones d'évacuation, telles que des rivières ou des bassins de rétention. Ces éléments garantissent une gestion efficace des eaux de pluie excédentaires et contribuent à la prévention des problèmes d'engorgement et d'inondation.

5. Entretien du Modelé du Terrain

L'entretien du modelé du terrain est essentiel pour assurer son efficacité à long terme. Cela commence par une surveillance régulière, consistant en des inspections approfondies des canaux et des fossés. Ces vérifications permettent de s'assurer qu'aucune obstruction, comme des débris ou de la végétation, ne bloque le flux d'eau, ce qui pourrait compromettre le drainage.

En parallèle, un programme de maintenance est indispensable. Cela inclut le nettoyage périodique des infrastructures pour éliminer les sédiments et les débris accumulés, ainsi que la réhabilitation des éléments endommagés. Ce travail préventif aide à maintenir la performance des systèmes de drainage et à prolonger leur durée de vie, garantissant ainsi une gestion optimale des eaux de pluie et une protection continue des terres agricoles. Un entretien rigoureux contribue également à la durabilité des écosystèmes environnants, en minimisant les impacts négatifs sur le sol et la biodiversité.

3.3 Collecte et évacuation des eaux

Le réseau de drainage est composé de collecteurs primaires, secondaires et principaux. Chaque collecteur est dimensionné pour évacuer le débit intercepté par le réseau dans sa partie amont, connu sous le nom de débit de collecte en condition d'écoulement à surface libre. Cela garantit que chaque segment du réseau peut gérer les volumes d'eau attendus sans risque de débordement.

À mesure que l'eau progresse vers l'aval, elle est acheminée vers le collecteur principal, qui est orienté vers un émissaire au point d'évacuation adéquat. Une gestion adéquate de ces eaux est essentielle pour réduire les risques d'inondation, protéger les cultures et limiter l'érosion des sols.

Chapitre 4 : Réseau d'assainissement des sols

Introduction

L'irrigation et le drainage jouent un rôle important dans la gestion des ressources en eau et l'optimisation des rendements agricoles., le réseau d'assainissement des sols Parmi les éléments essentiels de cette gestion, il permet d'éliminer l'excès d'eau, garantissant ainsi des conditions de croissance optimales pour les cultures. Dans ce chapitre, nous explorerons les différentes composantes de ce réseau, en abordant le tracé et le dimensionnement des collecteurs, ainsi que les raccordements nécessaires à une efficacité maximale. Nous examinerons également les effets globaux que l'assainissement peut avoir sur la qualité des sols et la productivité agricole.

4.1 Tracé du réseau de collecteurs

Le tracé du réseau de collecteurs pour les sols agricoles dans le cadre de l'assainissement vise à collecter les eaux de drainage agricole et à les gérer de manière appropriée. Il s'agit de concevoir un système de canaux ou de fossés qui permettent de collecter les eaux de ruissellement, les eaux d'irrigation et les eaux de drainage provenant des terres agricoles. Le tracé du réseau de collecteurs est basé sur des considérations telles que la topographie, la pente du terrain, la gestion des excès d'eau et la minimisation de l'érosion du sol. L'objectif principal est de contrôler le drainage dans les sols agricoles afin d'optimiser les conditions de croissance des cultures et de prévenir les problèmes d'engorgement ou de lessivage des nutriments.

La conception d'un bon tracé du réseau des collecteurs (Fig 24), en tenant compte de la pente et de la position de l'émissaire final, peut être réalisée en suivant les étapes générales suivantes :

- 1-** Effectuez une étude préliminaire du bassin versant pour comprendre les caractéristiques topographiques, la géologie, l'hydrologie et les contraintes environnementales de la région. Identifiez les points d'évacuation possibles, tels que les cours d'eau ou la mer, ainsi que les contraintes potentielles, comme les zones sensibles sur le plan environnemental.

- 2-** Effectuez une analyse hydraulique pour déterminer les débits d'écoulement attendus dans le réseau de collecteurs. Cela implique d'estimer les débits de pointe en utilisant des méthodes appropriées, telles que les méthodes rationnelles ou les modèles hydrologiques.

- 3** -Analysez la topographie du terrain pour déterminer la pente naturelle du terrain. La pente du terrain joue un rôle crucial dans le dimensionnement des collecteurs et la gestion de l'écoulement. Essayez de suivre la pente naturelle autant que possible pour faciliter l'écoulement gravitaire des eaux usées.

- 4-**Prenez en compte les considérations environnementales lors de la planification du tracé du réseau. Évitez les zones sensibles, respectez les réglementations environnementales et cherchez des solutions durables pour minimiser les impacts sur l'environnement.

- 5-**Effectuez des études géotechniques pour évaluer la stabilité du sol et prendre des mesures appropriées pour soutenir les collecteurs dans des zones présentant des conditions géotechniques difficiles.

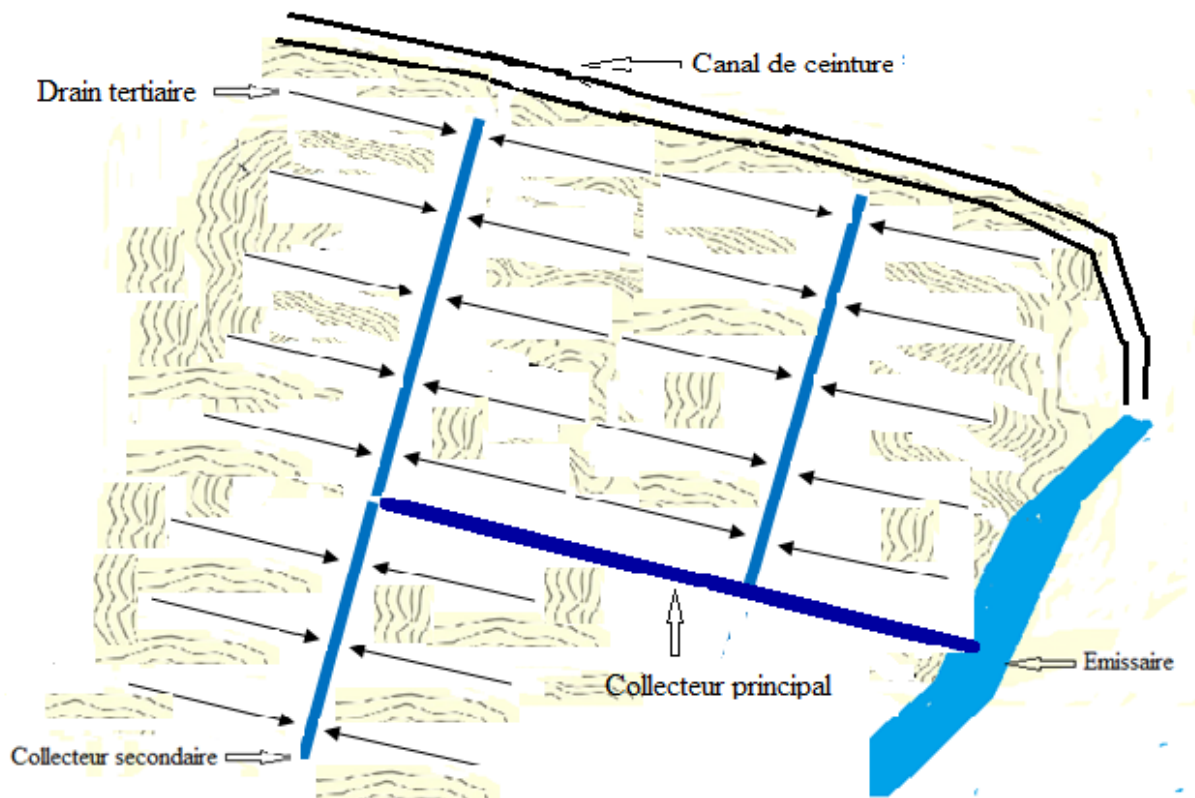


Fig 24: Réseau de collecteurs de drainage agricole

4.2 Dimensionnement des collecteurs

4.2.1 Forme générale

Le dimensionnement des collecteurs dans le contexte des sols agricoles consiste à déterminer la taille et la capacité appropriées des canaux ou des fossés de collecte. Cela dépend des caractéristiques spécifiques de la zone agricole, telles que la superficie, le type de culture, les précipitations et la capacité d'infiltration du sol. Le dimensionnement vise à assurer un drainage efficace en évacuant rapidement l'excès d'eau tout en évitant l'érosion du sol et la perte de nutriments. Il peut également être nécessaire de dimensionner les collecteurs pour gérer les eaux d'irrigation, en veillant à ce que la quantité d'eau apportée soit adéquate pour les besoins des cultures sans entraîner de stagnation ou de lessivage excessif.

Dans le drainage agricole, plusieurs formes de collecteurs sont couramment utilisées, notamment le profil rectangulaire, le profil semi-circulaire et, surtout, le profil trapézoïdal, qui est la forme la plus adoptée (fig 25). Cette dernière offre une bonne capacité d'écoulement et une stabilité accrue, ce qui en fait une option privilégiée pour les systèmes de drainage.

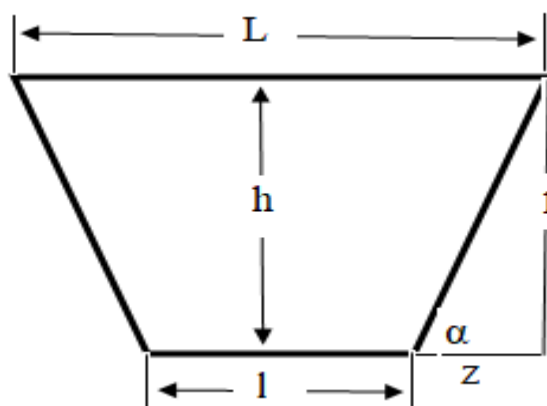


Fig 25 : Profil de collecteur trapézoïdale

où :

l : la petite base du collecteur (m)

h : est la hauteur d'eau dans le collecteur (m)

z : est un coefficient qui dépend de la géométrie du collecteur c'est-à-dire l'inclinaison de ses talus.

α : Angle d'inclinaison des talus

L : grande base du collecteur (m)

Les valeurs maximales d'inclinaison recommandées pour les collecteurs de forme trapézoïdale varient selon la nature du terrain, comme indiqué dans le tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Valeurs maximales d'inclinaison recommandées

Nature du sol	Angle (α)	Rapport (1: z)
Roche	90°	1: 0
Argile pure	72°	1:0,33
Terre argileuse	60°	1:0,5
Terre franche	45°	1:1
Sable	26°	1:2

NB/ lors du dimensionnement des collecteurs, on peut prévoir une revanche. En hydraulique, le terme "**revanche**" peut également désigner une profondeur supplémentaire dans un canal,

prévue pour accueillir un surplus d'eau. Cette réserve aide à prévenir les débordements lors de fortes pluies ou de crues. Cette capacité supplémentaire permet de gérer les variations de débit et de maintenir la sécurité des infrastructures en évitant les inondations.

4.2.2 Section mouillée du collecteur trapézoïdal

En se basant sur les formules fondamentales de l'hydraulique, la section mouillée transversale du collecteur en m², calculée en fonction de la hauteur d'eau et de la base du collecteur. La section mouillée d'un collecteur trapézoïdal (**S**) peut être calculée à l'aide des deux formules suivantes :

Formule 1

$$S = h (l + h \times \cot \alpha) \quad 43$$

Formule 2

$$S = h (l + z \times h) \quad 44$$

Les deux formules expriment la même relation, mais avec des approches différentes. La première utilise directement l'angle d'inclinaison (α), tandis que la seconde introduit un coefficient géométrique (z) pour simplifier le calcul. Elles peuvent être utilisées selon les besoins spécifiques de chaque situation.

Nous rappelons que les l'ensemble des paramètres sont définis dans le paragraphe précédent.

NB / Pour les autres formes de collecteurs, référez-vous à votre cours d'hydraulique.

4.2.3 Périmètre mouillée du collecteur trapézoïdal

En se basant sur les formules fondamentales de l'hydraulique, le périmètre mouillée d'un collecteur trapézoïdal peut également être calculée à l'aide des deux formules ci-dessous qui peuvent être utilisées selon les besoins spécifiques de chaque situation.

Formule1:

$$P = \left(l + \frac{2h}{\sin \alpha} \right) \quad 45$$

Formule 2:

$$P = l + 2 \times h \sqrt{z^2 + 1} \quad 46$$

NB / Pour les autres formes de collecteurs, référez-vous à votre cours d'hydraulique.

4.2.4 Rayon hydraulique du collecteur

Le rayon hydraulique (Rh) d'un collecteur est défini comme le rapport entre sa section mouillée (S) et son périmètre mouillé (P). Il s'exprime par la formule suivante:

$$\mathbf{Rh} = \frac{\mathbf{S}}{\mathbf{P}} \quad 47$$

Cette mesure est essentielle pour analyser l'écoulement des fluides et évaluer les performances hydrauliques des systèmes de drainage.

4.2.5 Vitesse d'écoulement de l'eau

La vitesse d'écoulement de l'eau est donnée par la formule de Manning-Strickler ci-dessous. La formule de Manning-Strickler, aussi appelée formule de Gauckler-Manning, est une méthode pour estimer la vitesse moyenne d'un liquide s'écoulant en surface libre, comme dans un canal ouvert. Ce type d'écoulement est influencé par la gravité. Cette formule a été d'abord créée par l'ingénieur français Philippe Gauckler en 1867, puis améliorée par l'ingénieur irlandais Robert Manning en 1890. Elle s'écrit comme suit :

$$\mathbf{V} = \mathbf{Ks} \times \frac{\mathbf{Rh}^2}{3} \times \frac{\mathbf{I1}}{2} \quad 48$$

Et s'écrit également :

$$\mathbf{V} = \frac{1}{\mathbf{n}} \times \frac{\mathbf{R}^2}{3} \times \frac{\mathbf{I1}}{2} \quad 49$$

où

V: vitesse d'écoulement de l'eau en m/s

Ks: coefficient de Strickler (m^{1/3}/s)

Rh : le rayon hydraulique du collecteur, exprimé en mètres

I : la pente longitudinale du collecteur (terrain), exprimée en m/m,

n: coefficient de rugosité de Manning (sans unité), qui représente la rugosité de la surface du collecteur.

Remarque : Le coefficient de Strickler ($K_s = 1/n$) est l'inverse du coefficient de Manning n , souvent utilisé aux États-Unis. Le coefficient K_s varie de 20 pour des surfaces rugueuses comme la pierre brute, à 80 pour des surfaces lisses comme le béton ou la fonte.

Il convient de noter que la valeur du coefficient de rugosité (n) dépend du matériau du collecteur et peut varier en fonction de son état d'entretien. Des valeurs typiques de n pour différents matériaux sont souvent disponibles dans les tables de référence utilisées dans le domaine de l'assainissement. Quelques valeurs du coefficient de Manning (n) sont présentées dans le tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : coefficient de Manning selon la nature des surfaces des collecteurs

Nature des surfaces	Etat des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Canaux en terre droits et uniforme	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
Propres avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

4.2.6 Débit à évacuer par le collecteur

Le débit à évacuer par le collecteur dépend de plusieurs paramètres liés au collecteur, notamment son rayon hydraulique, sa pente longitudinale, la pente des talus la rugosité de sa surface et sa section transversale mouillée.

Le débit (Q) est le produit de la vitesse (V) d'écoulement de l'eau à la section mouillée (S) comme suit :

$$Q = V \times S$$

50

4.2.7 Exemple d'application

Un collecteur en terre droits et uniforme, en bon état, est conçu pour évacuer les eaux de drainage et est situé à la périphérie de la surface agricole drainée. Les caractéristiques du collecteur sont les suivantes:

- Profil trapézoïdal
- Angle d'inclinaison des talus: 45°
- Profondeur: 2,80 m
- Largeur du lit: 2 m
- Pente longitudinale: 1 ‰

En tenant compte de la nature du terrain, veuillez déterminer pour chacun des deux cas ci-dessous :

1. La section mouillée et le périmètre mouillé du collecteur.
2. Le débit possible à évacuer:
 - **Premier cas** : Sans tenir compte d'une revanche.
 - **Deuxième cas** : En tenant compte d'une revanche de 0,40 m.

Solution

Lors de la résolution de cet exemple illustratif, nous utiliserons délibérément les deux formules présentées précédemment pour calculer les paramètres demandés, uniquement à titre indicatif.

Premier cas : Sans tenir compte d'une revanche

1- Calcul de section mouillée (S)

Sachant que pour un collecteur en terre droits et uniforme, en bon état, le coefficient de rugosité de Manning (n) est pris égal à 0,02.

Avec un angle d'inclinaison des talus du collecteur $\alpha = 45^\circ$, donc la valeur de $z = 1$

La profondeur du collecteur: $h = 2,80$

Largeur du lit : $l = 2$

Pente: $I = 1 \text{ ‰}$

Formule 1: $S = h (l + h \times \cot \alpha)$

$$S = 2,80 (2 + 2,80 \times \cot 45) = \mathbf{13.44 \text{ m}^2}$$

Ou bien

Formule 2: $S = h (l + z \times h)$

$$S = 2,80 (2 + 1 \times 2,80) = 13,44 \text{ m}^2$$

2- Calcul du périmètre mouillé (P)

Formule 1: $P = (l + \frac{2h}{\sin \alpha})$

$$P = (2 + \frac{2 \times 2,80}{\sin 45}) = 9,92 \text{ m}$$

Ou bien

Formule 2: $P = l + 2 \times h \sqrt{z^2 + 1}$

$$P = 2 + 2 \times 2,80 \sqrt{1^2 + 1} = 9,92 \text{ m}$$

3- Calcul du rayon hydraulique

$$Rh = \frac{S}{P} = \frac{13,44}{9,92} = 1,35 \text{ m}$$

4-Calcul de la vitesse de l'eau dans le collecteur (V)

$$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times I^{1/2}$$

$$V = \frac{1}{0,02} \times (1,35)^{2/3} \times (0,001)^{1/2} = 50 \times 1,2214 \times 0,03162 \approx 1,93 \text{ m/s}$$

5-Calcul du débit à évacuer par le collecteur (Q)

$$Q = V \times S = 1,93 \times 13,44 = 25,94 = \text{m}^3/\text{s}$$

Deuxième cas : En tenant compte d'une revanche de 0,40 m

1-Calcul de section mouillée (S)

$$h = 2,80 - 0,40 = 2,4$$

Formule 1: $S = h (l + h \times \cot \alpha)$

$$S = 2,40 (2 + 2,40 \times \cot 45) = 10,56 \text{ m}^2$$

Ou bien

Formule 2: $S = h (l + z \times h)$

$$S = 2,40 (2 + 1 \times 2,40) = 10,56 \text{ m}^2$$

2-Calcul du périmètre mouillé (P)

Formule 1: $P = (1 + \frac{2h}{\sin \alpha})$

$$P = (2 + \frac{2 \times 2,40}{\sin 45}) = 8,79 \text{ m}$$

Ou bien

Formule 2: $P = 1 + 2 \times h \sqrt{z^2 + 1}$

$$P = 2 + 2 \times 2,40 \sqrt{1^2 + 1} = 8,79 \text{ m}$$

4- Calcul du rayon hydraulique (Rh)

$$Rh = \frac{S}{P} = \frac{10,56}{8,79} = 1,20 \text{ m}$$

5-Calcul de la vitesse de l'eau dans le collecteur (V)

$$V = \frac{1}{n} \times (R)^{2/3} \times (I)^{1/2}$$

$$V = \frac{1}{0,02} \times (1,20)^{2/3} \times (0,001)^{1/2} = 1,78 \text{ m/s}$$

6-Calcul du débit à évacuer par le collecteur (Q)

$$Q = V \times S = 1,78 \times 10,56 = 18,80 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3 Raccordements

Les raccordements dans le contexte des sols agricoles font référence aux connexions des champs ou des parcelles individuelles au réseau de collecteurs, Cela peut impliquer la création de canaux latéraux ou de drains souterrains pour permettre l'écoulement de l'eau des terres agricoles vers les canaux principaux ou les fossés de collecte, Les raccordements sont conçus pour faciliter l'évacuation de l'excès d'eau des champs, améliorer le drainage et prévenir les problèmes de saturation du sol, Ils sont adaptés en fonction des besoins spécifiques de chaque

parcelle agricole, en tenant compte de facteurs tels que la topographie, la configuration du terrain et les pratiques culturales.

4.4 Effets généraux de l'assainissement

L'assainissement des sols agricoles est une pratique essentielle qui joue un rôle important dans la durabilité et la productivité des systèmes agricoles. En améliorant la gestion de l'eau et la qualité des sols, cette approche offre de nombreux avantages, tant pour les cultures que pour l'environnement. Les effets positifs de l'assainissement sont variés, allant de la prévention de l'engorgement et de l'érosion à la protection des ressources en eau. Les principaux effets sont :

1-Prévention de l'engorgement et de l'érosion

L'assainissement des sols agricoles contribue à prévenir l'engorgement des sols en contrôlant le drainage et en gérant efficacement l'excès d'eau. Cela réduit l'érosion et la perte de nutriments, créant ainsi des conditions optimales pour la croissance des cultures.

2. Amélioration de la productivité agricole

Des sols bien assainis favorisent une productivité agricole accrue, ce qui réduit également les risques de pertes de récolte liées à des conditions défavorables.

3. Amélioration de la perméabilité à l'air

L'assainissement favorise la perméabilité à l'air, permettant une meilleure circulation de l'oxygène, ce qui stimule l'activité respiratoire des racines et des micro-organismes essentiels pour la santé des sols.

4. Stabilisation de la température du sol

En empêchant l'abaissement de la température du sol, l'assainissement évite les retards de croissance des plantes, assurant ainsi un développement optimal.

5. Augmentation de la réserve en eau

Enfin, un sol bien assaini permet une meilleure pénétration racinaire, augmentant la réserve en eau disponible pour les plantes et favorisant leur croissance même en période de sécheresse.

6. Protection des ressources en eau

Un bon assainissement aide à protéger les ressources en eau en minimisant le lessivage des pesticides, des fertilisants et d'autres substances potentiellement nocives, limitant ainsi leur contamination des eaux souterraines et des cours d'eau avoisinants.

7. Durabilité environnementale

Cette pratique contribue à la durabilité en préservant la qualité des sols et en minimisant les impacts négatifs sur les écosystèmes environnants.

Références

[1] Kramer P.J., Boyer J.S. (1995) Water relations of plants and soils. San Diego, Etats-Unis, Academic Press, 495 p.

[2] Hillel D. (1998) Environmental soil physics. Academic Press, San Diego

[3] Ollier C. H., Poirée M. (1981) Les réseaux d'irrigation-théorie, technique et économie des arrosages. Ed, Eyrolles, Paris, 503 p.

[4] Duchaufour P. (2000) Introduction à la science du sol. 331p.

[5] Allen R. G., Luis S., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy, FAO. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>

[6] Tiercelin J-R, Vidal, (2006)- 2^{ème} Edition Traité d'irrigation Ed Lavoisier, 1251p

[7] Rieul R (1993). Les techniques modernes d'irrigation et les économies d'eau, Etat de l'agriculture en Méditerranée : Ressources en eau : développement et gestion dans les pays méditerranéens, Bari : CIHEAM, p, 177-197 , Cahiers Options Méditerranéennes; n, 1(1))

[8] Zaghouane O., Chadouli A., Djane-Hamed, M (2014). Installation et gestion d'un réseau d'irrigation. ITGC, Brochure, 10 P

[9] Sawa, P., & Frenken. (2001). Module8 : Systèmes d'irrigation par aspersion : planification, conception, exploitation et maintenance. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et Bureau sous-régional pour l'Afrique orientale et australe (SAFR), 29(342), 487. <https://doi.org/10.1017/S1026881200127618>

[10] Ascough, G., & Kiker, G. (2002). The effect of irrigation uniformity on irrigation water requirements. Water SA, 28(2), 235-242. <https://doi.org/10.4314/wsa.v28i2.4890>

[11] Castillo, S. (2022). Drip Irrigation Components (pp. 151–213). https://doi.org/10.1007/978-981-19-2775-1_7

[12] Keller, J and Karmeli, D, (1974). Trickle Irrigation Design Parameters, Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 17, 678-684, - References - Scientific Research Publishing

[13] FAO. (2005). Materials for subsurface land drainage systems, by L.C.P.M. Stuyt, W. Diericks & J. Martínez Beltrán. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 60 Rev. 1. Rome. 183 pp.

[14] Van der Molen, Martínez Beltrán, Ochs. (2007). Guidelines and computer programs for the planning and design of land drainage systems. FAO Irrigation and Drainage Paper 62. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

[15] Vincent B. (2020). Principes techniques et chiffres du drainage agricole de la tuyautique à l'hydro diplomatie. Sciences Eaux & Territoires, 32, pp.8-15. 10.14758/SET- REVUE. 2020.2.02. hal- 02610318f

[16] Mermoud, A. (2007). "Gestion du régime hydrique des sols". Cours d'Assainissement du sol., École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 100 P