

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Institut de Technologie



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -
معهد التكنولوجيا

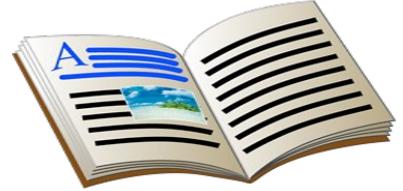
Département de Génie de l'Eau

Polycopié de cours

En : Hydraulique

Spécialité : Génie de l'Eau

Niveau : Licence



Réseaux Modernes d'Irrigation

Par : DAHMANI Saad

Année :2022/2023

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| I | Pédologie | 10 |
| 1 | Généralités sur le sol | 11 |
| 1.1 | Introduction | 11 |
| 1.2 | Définitions | 11 |
| 1.2.1 | La pédologie | 11 |
| 1.2.2 | Le sol | 11 |
| 1.2.2.1 | Définition pédologique | 11 |
| 1.2.2.2 | Définition agronomique | 12 |
| 1.3 | Composants du sol | 12 |
| 1.4 | Propriétés physiques du sol | 13 |
| 1.4.1 | Masse volumique réelle | 13 |
| 1.4.2 | Masse volumique apparente sèche | 14 |
| 1.4.3 | Texture du sol | 14 |
| 1.4.4 | Structure du sol | 16 |
| 1.4.5 | La porosité | 17 |
| 1.4.6 | L'indice des vides | 18 |
| 1.4.7 | Densité apparente | 18 |
| 1.4.8 | Couleur du sol | 18 |
| 1.4.9 | Pente du sol | 19 |
| 1.4.10 | Profondeur du sol | 19 |
| 1.5 | Propriétés chimiques du sol | 19 |
| 1.5.1 | pH du sol | 19 |
| 1.5.2 | Capacité d'échange cationique (C.E.C) | 20 |
| 1.6 | La matière organique | 21 |
| 1.6.1 | La matière organique (MO) non décomposée | 21 |
| 1.6.2 | La matière organique (MO) décomposée | 21 |
| 1.7 | Application | 22 |
| 2 | L'eau dans le sol | 23 |
| 2.1 | Introduction | 23 |
| 2.2 | Les mouvements de l'eau dans le sol | 23 |
| 2.3 | La teneur en eau | 23 |
| 2.3.1 | La teneur en eau volumique θ | 23 |
| 2.3.2 | La teneur en eau pondérale ω | 24 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3.3 | Les teneurs en eau caractéristiques | 24 |
| 2.4 | La macro et la micro-porosité du sol | 25 |
| 2.4.1 | Macroporosité | 25 |
| 2.4.2 | Microporosité | 26 |
| 2.5 | États de l'eau dans le sol | 26 |
| 2.5.1 | Eau de gravité (ou de saturation) | 26 |
| 2.5.2 | L'eau utilisable par la plante | 26 |
| 2.5.3 | L'eau inutilisable par la plante | 26 |
| 2.6 | Forces agissant sur l'eau dans le sol | 26 |
| 2.7 | La réserve de l'eau dans le sol | 28 |
| 2.7.1 | Réserve utile (RU) | 28 |
| 2.7.2 | Réserve facilement utilisable (RFU) | 28 |
| 2.8 | La capillarité | 29 |
| 2.9 | Le potentiel matriciel | 29 |

II Irrigation 32

3 Évaluation des besoins en eau des plantes 33

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Introduction | 33 |
| 3.2 | Besoins en eau des cultures | 33 |
| 3.2.1 | L'évapotranspiration | 33 |
| 3.2.2 | Définition besoins en eau des cultures | 33 |
| 3.2.3 | L'évapotranspiration potentielle ou de référence (ET_0 ou ETP) | 34 |
| 3.2.4 | Coefficient de culture (K_c) | 34 |
| 3.2.5 | Évapotranspiration maximale ou de culture (ETM) | 35 |
| 3.2.6 | Évapotranspiration réelle (ETR) ou de culture (ETc) | 35 |
| 3.2.7 | Coefficient de sécheresse (K_s) | 36 |
| 3.3 | Méthodes d'évaluation de l'ETP | 38 |
| 3.3.1 | Mesure de l'évaporation | 38 |
| 3.3.2 | Mesure de la transpiration | 39 |
| 3.3.3 | Calcul de l'évapotranspiration potentielle ou de référence ET_0 ou ETP | 39 |
| 3.4 | Application | 42 |

4 Les besoins en eau d'irrigation 46

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Introduction | 46 |
| 4.2 | Les besoins en eau d'irrigation | 46 |
| 4.2.1 | Définition | 46 |
| 4.3 | Évaluation des besoins nets d'irrigation | 47 |
| 4.3.1 | Calcul de pluie efficace | 47 |
| 4.4 | Efficiences d'irrigation | 47 |
| 4.4.1 | Efficacité de transport E_t | 48 |
| 4.4.2 | Efficacité de distribution E_d | 48 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.4.3 | Efficacité de l'uniformité E_u | 48 |
| 4.5 | Évaluation des besoins bruts d'irrigation | 48 |
| 4.6 | Doses et fréquence d'arrosage | 48 |
| 4.6.1 | Dose pratique d'arrosage | 48 |
| 4.6.2 | Fréquence d'arrosage | 48 |
| 4.6.3 | Dose réelle d'arrosage | 49 |
| 4.7 | Débit spécifique et débit caractéristique | 49 |
| 4.8 | Débit spécifique | 49 |
| 4.8.1 | Débit caractéristique | 49 |
| 4.9 | Application | 49 |
| 5 | Irrigation de surface | 52 |
| 5.1 | Introduction | 52 |
| 5.2 | Irrigation par bassins | 52 |
| 5.2.1 | Dimensionnement et aménagement du sol | 52 |
| 5.2.2 | Cultures recommandées | 53 |
| 5.2.3 | Méthodes de mise en eau des bassins | 53 |
| 5.2.3.1 | La méthode directe | 53 |
| 5.2.3.2 | La méthode d'alimentation en cascade | 54 |
| 5.3 | Irrigation par sillons (à la raie) | 55 |
| 5.3.1 | Dimensionnement et aménagement du sol | 55 |
| 5.3.2 | Cultures recommandées | 57 |
| 5.3.3 | Profils d'humectation | 58 |
| 5.4 | Irrigation par planche | 58 |
| 5.4.1 | Dimensionnement et aménagement du sol | 59 |
| 5.4.2 | Cultures recommandées | 59 |
| 5.4.3 | La mise en eau des planches | 59 |
| 5.4.4 | Profils d'humectation | 60 |
| 5.5 | Sommaire | 61 |
| 6 | Irrigation par aspersion | 62 |
| 6.1 | Définition | 62 |
| 6.2 | Les éléments d'une installation d'aspersion | 62 |
| 6.2.1 | La source d'eau | 62 |
| 6.2.2 | La conduite de distribution principale | 63 |
| 6.2.3 | La conduite d'approche (porte-rampes) | 63 |
| 6.2.4 | Les rampes | 63 |
| 6.2.5 | Les asperseurs | 64 |
| 6.2.5.1 | Remarque | 65 |
| 6.3 | Cultures recommandées | 65 |
| 6.4 | Schémas d'installation | 66 |
| 6.5 | Profils d'humectation | 67 |
| 6.6 | Dimensionnement simplifié | 69 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.7 | Avantages de l'irrigation par aspersion | 72 |
| 6.8 | Inconvénients de l'irrigation par aspersion | 72 |
| 6.9 | Autres techniques d'irrigation par aspersion | 73 |
| 6.9.1 | Le pivot | 73 |
| 6.9.2 | Asperseurs avec rallonge à tuyau souple | 73 |
| 6.10 | Application - Calcul d'une installation d'aspersion | 75 |
| 6.10.1 | Couverture totale | 75 |
| 6.10.2 | Couverture intégrale | 77 |
| 6.11 | Sommaire | 78 |
| 7 | Irrigation localisée | 79 |
| 7.1 | Définition | 79 |
| 7.2 | Caractéristiques principales | 80 |
| 7.3 | Schéma type d'une installation d'irrigation localisée | 81 |
| 7.4 | Cultures recommandées | 81 |
| 7.5 | Types du sol et pentes adéquats | 82 |
| 7.6 | Avantages et inconvénients | 82 |
| 7.6.1 | Avantages de l'irrigation localisée | 82 |
| 7.6.2 | Inconvénients de l'irrigation localisée | 83 |
| 7.7 | Qualité de l'eau | 83 |
| 7.8 | Profils d'humectation | 84 |
| 7.9 | Calcul d'une installation d'irrigation localisée | 84 |
| 7.9.1 | Besoin en eau des cultures en irrigation localisée | 84 |
| 7.9.2 | Dose nette d'arrosage D_{nette} | 86 |
| 7.9.3 | Fréquence d'arrosage (espacement maximal entre arrosage) f | 86 |
| 7.10 | Application | 86 |
| 7.11 | Sommaire | 88 |
| 8 | Choix de la méthode d'irrigation | 89 |
| 8.1 | Introduction | 89 |
| 8.2 | Conditions naturelles | 89 |
| 8.2.1 | Types du sol | 89 |
| 8.2.2 | La pente du sol | 89 |
| 8.2.3 | Le climat | 90 |
| 8.2.4 | La disponibilité de l'eau | 90 |
| 8.2.5 | La qualité d'eau d'irrigation | 90 |
| 8.3 | Les types de cultures pratiquées | 90 |
| 8.3.1 | Le types de cultures | 90 |
| 8.3.2 | La valeur financière de la production | 90 |
| 8.3.3 | La disposition des plantes | 90 |
| 8.4 | Le niveau de technicité, les traditions et la main d'œuvre | 91 |
| 8.4.1 | Le niveau de technicité | 91 |
| 8.4.2 | Les tradition d'irrigation | 91 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 8.4.3 | La disponibilité de la main d'œuvre | 91 |
| 8.5 | Coût et bénéfices | 91 |
| | Bibliographie | 92 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Exemple de masse volumique réelle de quelques constituants du sol | 14 |
| 1.2 | Les valeurs moyennes des masses volumiques réelles selon le type de sol | 14 |
| 1.3 | Masse volumique apparente sèche de quelques sols | 14 |
| 1.4 | Classification des matériaux composant le sol (Musy and Soutter, 1991) | 15 |
| 1.5 | Porosité de quelques sols | 17 |
| 1.6 | Classification des sols en fonction de la profondeur (Ali, 2010, page 112) | 19 |
| 1.7 | Analyse granulométrique des sols | 22 |
| 1.8 | Classification texturale des sols | 22 |
| 2.1 | Valeurs indicative de potentiel matriciel pF (adapté depuis Davet, 1996) | 30 |
| 3.1 | Variation du K_c pour quelques cultures (climat semi-humide, Humidité relative minimale $RH_{min} = 45\%$) (Tiercelin (2006), p.247) | 36 |
| 3.2 | Valeurs de coefficient C pour différents types de bac | 39 |
| 4.1 | Données climatiques et culturelles | 50 |
| 5.1 | Les longueurs maximales (indicatives) des sillons en fonction de la pente du terrain (i), le débit (Q), la dose d'arrosage (B) et du type du sol | 56 |
| 5.2 | Dimensions maximales (indicatives) des planches | 59 |
| 6.1 | Caractéristiques des portes-rampes les plus fréquentes (Cemagref/IRSTEA,2006) | 63 |
| 6.2 | Caractéristiques des asperseurs (Cemagref/IRSTEA,2006) | 64 |

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Les horizons du sol (couche arable, horizon pédologique et roche mère) | 12 |
| 1.2 | Les composants du sol | 12 |
| 1.3 | Composition de volume du sol (N_2 (azote gazeux); O_2 (d'oxygène); CO_2 (gaz carbonique); CH_4 (Méthane); H_2S (Sulfure d'hydrogène)) | 13 |
| 1.4 | Triangle de classification texturale des sols (adapté depuis Calvet, 2005) | 15 |
| 1.5 | Triangle de classification texturale des sols (Gobat et al., 2010) | 16 |
| 1.6 | Les principales structures du sol : (a), (c) et (d) sont des structure d'un sol agricole | 16 |
| 1.7 | La macroporosité et la microporosité | 18 |
| 1.8 | Le complexe argilo-humique (CAH) et l'échange cationique (adaptée depuis Soltner (1992)) | 20 |
| 1.9 | Types de matières organiques | 21 |
| 1.10 | Classification des sols au moyen du triangle de classification texturale | 22 |
| | | |
| 2.1 | Les mouvements de l'eau dans le sol | 24 |
| 2.2 | Variation de la croissance des cultures (plantes) en fonction de l'humidité dans le sol (LAGACÉ, 2015) | 25 |
| 2.3 | États de l'eau dans le sol | 27 |
| 2.4 | Forces agissantes sur les particules de l'eau dans le sol | 27 |
| 2.5 | Phénomène de capillarité ("remontée capillaire")) | 29 |
| 2.6 | Tensiomètre et son principe de fonctionnement | 30 |
| 2.7 | Signification des valeurs de potentiel matriciel (Calvet, 2003). <i>r cap</i> : rayon des capillaire | 31 |
| | | |
| 3.1 | Évolution du Kc de la Tomate en fonction de stade végétatif | 35 |
| 3.2 | Évolution du Kc d'un arbre fruité en fonction de stade végétatif | 35 |
| 3.3 | Relations entre ET0, ETP et ETR (Modèle FAO-56). | 37 |
| 3.4 | La réserve d'eau dans le sol. | 37 |
| 3.5 | Ks en fonction de la réserve d'eau dans le sol S | 38 |
| 3.6 | Variation de la température du point de rosée en fonction de l'humidité et la température de l'air | 41 |
| | | |
| 5.1 | Irrigation par bassins (CLÉMENT and MEYLAN (1978)) | 53 |
| 5.2 | Aménagement des bassins d'irrigation | 54 |
| 5.3 | Utilisation des siphons | 54 |
| 5.4 | Irrigation directe des bassins : utilisation des tuyaux d'alimentation | 54 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.5 | Irrigation directe des bassins : Ouvertures temporaires dans les diguettes (Brouwer et al. (1990)) | 55 |
| 5.6 | Irrigation en cascade des bassins (Brouwer et al., 1990) | 55 |
| 5.7 | Forme des sillons (Brouwer et al., 1990) | 56 |
| 5.8 | Sillons profonds et de faible ouverture (sols sableux). | 56 |
| 5.9 | Sillons larges et de faible profondeur (sols argileux) | 57 |
| 5.10 | Moyens de réalisation des sillons. (a) : moyens manuels et traditionnels (sillon- neurs). (b) moyens mécaniques (Brouwer et al., 1990) | 57 |
| 5.11 | (a) Espacement important entre sillon, (b) irrigation insuffisante | 58 |
| 5.12 | (c) Irrigation idéale, (d) débordement d'eau (sur-irrigation) | 58 |
| 5.13 | Irrigation par planches | 58 |
| 5.14 | Irrigation inadéquate (faible débit et percolation profonde) | 60 |
| 5.15 | Fort débit et perte d'eau par drainage | 60 |
| 6.1 | Schéma général de l'irrigation par aspersion | 63 |
| 6.2 | (a) Tuyaux en acier galvanisé (ou aluminium) à raccord rapide, (b) montage du raccord, (c) fermeture du raccord (adapté depuis https://portablepiping.com/ home/products/galvanized-steel-pipe/) | 64 |
| 6.3 | Variation du débit et la portée d'un asperseur en fonction de la pression appli- quée (buse $4.4 \times 2.4mm$) | 64 |
| 6.4 | (a) Asperseur, (b) Buses (Modèles Sprinkler) | 65 |
| 6.5 | Installation d'irrigation par aspersion | 66 |
| 6.6 | (a) installation mobile classique, (b) installation avec tuyaux mobiles tertiaires, (c) installation avec quadrillage total, (d) installation en couverture intégrale (totale) | 66 |
| 6.7 | Profil d'humectation d'un asperseur isolé | 67 |
| 6.8 | Profil d'humectation des asperseurs en fonctionnement simultané (Brouwer et al. (1990)) | 68 |
| 6.9 | Installation d'irrigation par aspersion (CLÉMENT and MEYLAN (1978)) | 68 |
| 6.10 | Irrigation par Pivot | 73 |
| 6.11 | Régulation de débits des arroseurs d'un pivot en fonction de l'éloignement par apport à l'axe de rotation | 74 |
| 6.12 | Utilisation du pivot en irrigation de blé - sud algérien, W. Timimoun | 74 |
| 6.13 | Irrigation par rallonge à tuyau souple | 74 |
| 7.1 | Irrigation au goutte à goutte (seule la zone radiculaire est humidifiée) (Brouwer et al. (1990)) | 80 |
| 7.2 | Irrigation au goutte à goutte (seule la zone radiculaire est humidifiée)(Brouwer et al. (1990)) | 82 |
| 7.3 | Quelques types de goutteurs | 84 |
| 7.4 | Profils d'humectation en fonction de type du sol et de débit du goutteur (Brou- wer et al. (1990)) | 84 |
| 7.5 | Schéma d'installation d'irrigation goutte à goutte (Vermeiren and Jobling, 1983a) | 87 |

Introduction

Ce cours est destinés aux étudiants en **3ème année Licence Professionnelle Génie de l'Eau**.

L'irrigation est un aspect crucial de l'agriculture et de l'horticulture modernes, et elle joue un rôle vital dans la maximisation des rendements des cultures et l'utilisation efficace de l'eau.

Dans ce cours, nous couvrirons différents types de systèmes d'irrigation, notamment l'irrigation de surface, l'irrigation par aspersion et l'irrigation goutte à goutte. Nous plongerons dans les principes du mouvement de l'eau dans les sols et comment déterminer les besoins en eau des cultures. De plus, nous discuterons de la planification de l'irrigation, de l'entretien du système et de la gestion de la qualité de l'eau.

En effet, ce cours subdivise en deux parties et huit chapitres, à savoir :

— Partie I : Pédologie, qui englobe deux chapitres couvrant principalement :

1. Des généralités sur le sol, et
2. L'eau dans le sol.

— Partie II : Irrigation, qui couvre les thématiques suivantes :

1. Évaluation des besoins en eau des cultures,
2. L'évaluation des besoins en eau d'irrigation,
3. Techniques d'irrigation par surface,
4. Techniques d'irrigation par aspersion,
5. Techniques d'irrigation localisée, et finalement
6. Choix de la méthode d'irrigation.

Première partie

Pédologie

Chapitre 1

Généralités sur le sol

1.1 Introduction

Dans l'historique de l'humanité, l'homme a commencé à cultiver la terre avant plus de 10 000 ans. Avant 8 000 avant J.C., l'homme a cultivé le Blé et l'orge sauvage. À cette époque, l'homme a commencé d'abandonner la vie de nomade (la chasse et le ramassage des fruits) pour commencer l'agriculture (c'est une manière de soumettre la nature à leur volonté). Les premières activités agricoles ont commencé proche au Croissant fertile (Syrie + Iraq, au nord de désert Arabe). (3 000 ou 4 000 ans) plus tard, l'agriculture est apparue à la chine, au Mexique et au Pérou. L'agriculture touche la totalité des êtres vivants sur la terre. Et économiquement, elle touche directement plus de 70% de la population du monde.

1.2 Définitions

1.2.1 La pédologie

Le mot **Pédologie** est composé de deux parties : **Pédo = Pedon**, qui signifie ce qui se trouve en dessous de nous (de nos pieds) ou la couche superficielle du globe terrestre et **logie = Logos**, qui signifie science, discipline, etc. En effet, la pédologie est la science du sol, qui l'étudie dans son genèse et évolution (Mupala, 2019).

1.2.2 Le sol

1.2.2.1 Définition pédologique

En pédologie, le sol est un corps naturel qui a subi une évolution résultante d'une dégradation de la roche mère (sous-sol). La pédologie considère le sol avec ses horizons, elle le classe en regard de leur environnement naturel avec une attention particulière à leur utilisation pratique en agriculture et foresterie.

Ou, *"le sol est la formation naturelle de surface, de structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente, sous l'influence de divers processus physique, chimiques et biologiques."* (Mupala, 2019).

1.2.2.2 Définition agronomique

En agronomie, le sol est un milieu vivant de croissance des plantes. Il se compose principalement de matières organiques et de minéraux fins (formés en raison de la désintégration des roches). Le sol constitue un support pour les plantes et assure leur alimentation en eau et en nutriments ainsi l'aération de leurs racines (Asawa, 2006). L'agriculteur exploite la couche arable (plus riche en matières organiques). L'horizon entre la couche arable et la roche mère, contribue aussi à la nutrition de la plante en éléments minéraux et en eau. La figure 1.1 représente les principaux horizons du sol.

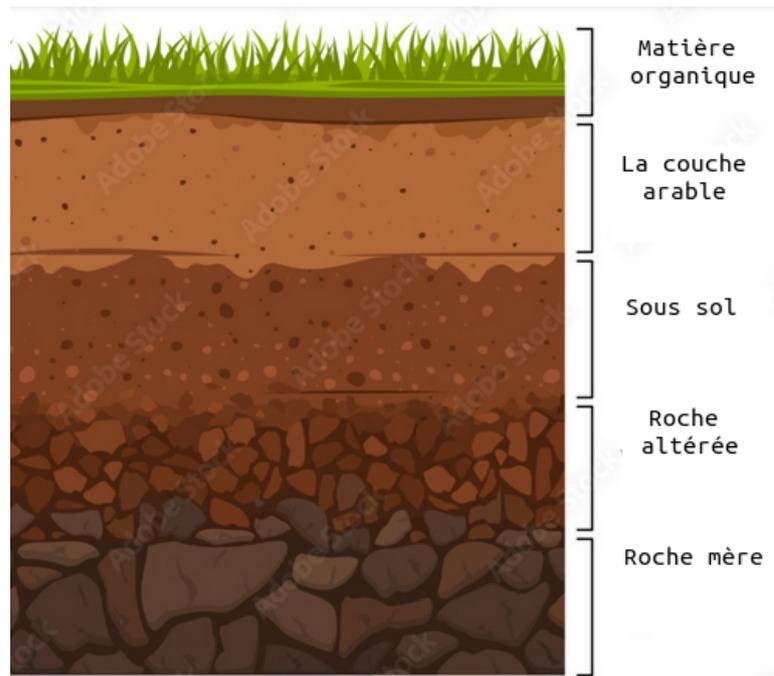


FIGURE 1.1 – Les horizons du sol (couche arable, horizon pédologique et roche mère)

1.3 Composants du sol

Le sol se compose de volume de solides et un autre de vides. Les figures 1.2 et 1.3 résument la composition du sol.

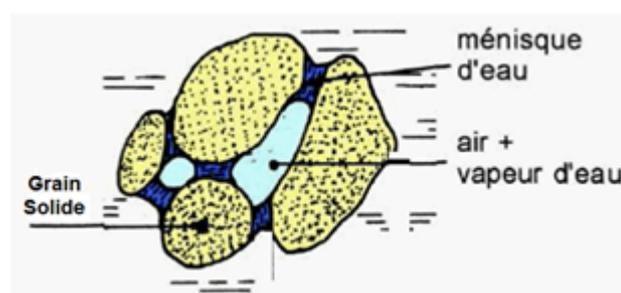


FIGURE 1.2 – Les composants du sol

- Le volume solide représente le squelette du sol.
- Le volume des vides = porosité totale.

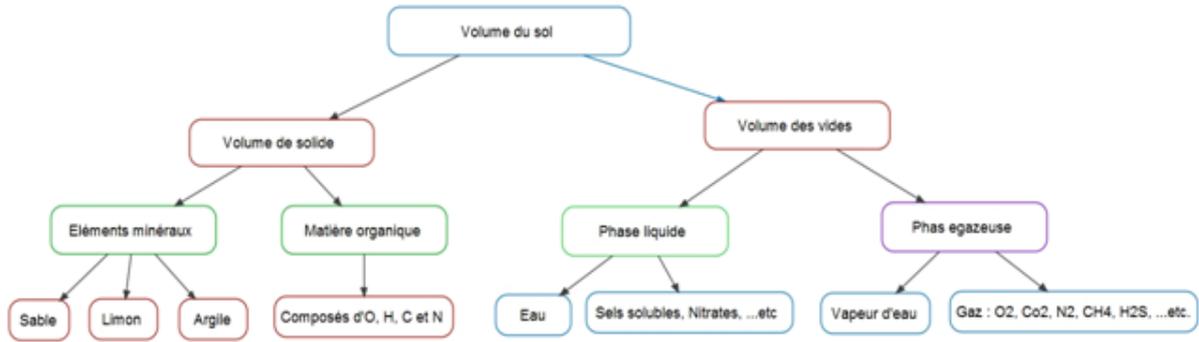


FIGURE 1.3 – Composition de volume du sol (N_2 (azote gazeux); O_2 (d'oxygène); CO_2 (gaz carbonique); CH_4 (Méthane); H_2S (Sulfure d'hydrogène))

- Les relations reliant les différents volumes du sol sont exprimées par les équations 1.1 et 1.2.

$$V_t = V_s + V_v = V_s + V_e + V_a \quad (1.1)$$

$$V_v = V_e + V_a \quad (1.2)$$

Tels que :

- V_t = Volume total du sol (Cm^3, M^3);
- V_s = Volume des solides (Cm^3, M^3);
- V_v = Volume des vides (Cm^3, M^3);
- V_e = Volume d'eau ou de liquide (Cm^3, M^3);
- V_a = Volume d'air ou de gaz (Cm^3, M^3).

1.4 Propriétés physiques du sol

La circulation de l'eau et de l'air dans le sol est nettement liée à sa porosité. Cette dernière se détermine par les propriétés physiques du sol, notamment la texture, la structure et la porosité du sol. Dans ce qui suit, les paramètres physiques du sol sont décrits brièvement.

1.4.1 Masse volumique réelle

Elle est exprimée par :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (1.3)$$

Tels que :

- ρ_s : Masse volumique réelle du sol ($g/Cm^3, \dots$);
- M_s : La masse des solides (les constituants solides du sol) (g, Kg, ...);
- V_s : Le volume des solides en (Cm^3, l, \dots).

TABLE 1.1 – Exemple de masse volumique réelle de quelques constituants du sol

| Élément du sol | Masse volumique réelle (g/Cm^3) |
|----------------------|-------------------------------------|
| Minéraux argileux | 2.0 – 2.7 |
| Limon et sable | 2,5 – 2,6 |
| Éléments métalliques | 4,9 – 5,3 |
| Fraction organique | 1,3 – 1,4 |

TABLE 1.2 – Les valeurs moyennes des masses volumiques réelles selon le type de sol

| Sol | Masse volumique réelle (g/Cm^3) |
|-----------------|-------------------------------------|
| Sols minéraux | 2,6 - 2,7 |
| Sols organiques | 1,4 - 2,0 |

1.4.2 Masse volumique apparente sèche

Elle permet de tenir compte de l'importance relative du volume des solides et des vides du sol.

$$\rho_{as} = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_v} \quad (1.4)$$

Avec :

- ρ_{as} : Masse volumique apparente sèche du sol (g/Cm^3);
- M_s : La masse des solides ;
- V_s : Le volume des solides ;
- V_v : Le volume des vides.

TABLE 1.3 – Masse volumique apparente sèche de quelques sols

| Sol | Masse volumique apparente sèche (g/Cm^3) |
|---------------|--|
| Sols sableux | 1,40 - 1,70 |
| Sols argileux | 1,00 - 1,50 |
| Les tourbes | 0,30 - 1,00 |

1.4.3 Texture du sol

La texture d'un sol (ou granulométrie) **est la représentation de la taille des particules** qui compose le sol. Elle est généralement décrite par **la classe texturale** basée sur les proportions (**%**) de **sable, limon et argile** dans le sol ou sur la distribution de la grosseur des particules du sol. Le triangle de la classification texturale (figure 1.4) peut être utilisé pour classer les sols.

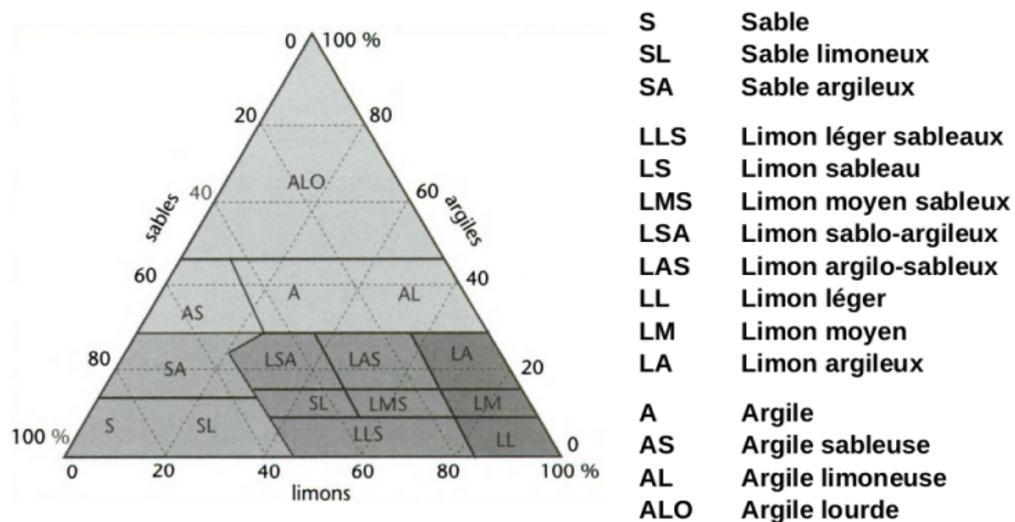
La texture du sol influe sur (Ali, 2010) :

- La circulation de l'eau et de l'air dans le sol ;

- La solubilité des sels (ou la capacité d'échange cationique, CEC) et développement des racines ;
- Le volume de l'eau stocké par le sol.

TABLE 1.4 – Classification des matériaux composant le sol (Musy and Soutter, 1991)

| Classe texturale | | Dimensions (diamètre) |
|------------------|----------|---------------------------------|
| Argile | | $\phi \leq 2\mu m$ |
| Limon (silt) | | $2\mu m < \phi \leq 50\mu m$ |
| Sable | fin | $50\mu m < \phi \leq 200\mu m$ |
| | moyen | $200\mu m < \phi \leq 500\mu m$ |
| | grossier | $0.5mm < \phi \leq 2m$ |
| Graviers | | $0.2cm < \phi \leq 2cm$ |
| Cailloux | | $2cm < \phi \leq 20cm$ |
| Blocs | | $> 20cm$ |

**FIGURE 1.4** – Triangle de classification texturale des sols (adapté depuis Calvet, 2005)

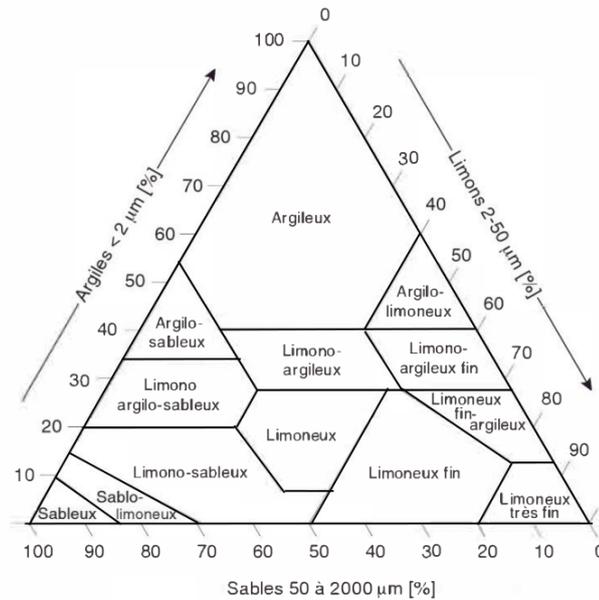


FIGURE 1.5 – Triangle de classification texturale des sols (Gobat et al., 2010)

1.4.4 Structure du sol

La structure du sol représente l'arrangement (ou la disposition) des particules du sol. Elle résulte de l'agrégation de la matière organique ou d'un autre liant tel que l'argile avec les autres composants du sol (Ali, 2010). Elle influe considérablement sur la porosité du sol et donc sur la circulation de l'eau et des gaz, ainsi sur la capacité de rétention de l'eau. Les principales structures sont mentionnées dans la figure 1.6 :

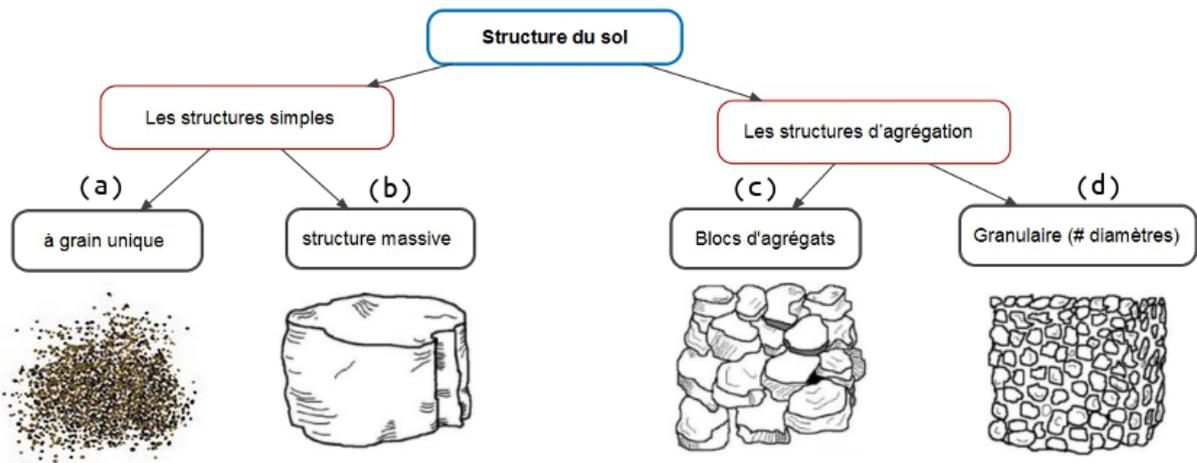


FIGURE 1.6 – Les principales structures du sol : (a), (c) et (d) sont des structure d'un sol agricole

Exemple : Sols à grain unique (sables lâches et limons avec un faible pourcentage de matière organique).

1.4.5 La porosité

La porosité p , est le rapport du volume des vides sur le volume total du sol (volume total du sol est appelé aussi le volume apparent), permet aussi de caractériser les espaces entre les particules du sol. Généralement, les sols agricoles se caractérisent par une porosité entre 35% et 55% (Ali, 2010). La porosité d'un sol se calcule par la formule 1.5 :

$$p = \frac{V_v}{V_v + V_s} \quad (1.5)$$

Tels que :

- p : la porosité (sans dimension, exprimée en %);
- V_v : le volume des vides;
- V_s : le volume solide.

TABLE 1.5 – Porosité de quelques sols

| Sol | Porosité |
|---------------|-----------|
| Sols minéraux | 30% - 60% |
| Les tourbes | 90% |

La porosité se décompose en deux types :

§1 Macroporosité : La partie des pores dont le diamètre dépasse 0.06mm (i.e., $\phi > 0.06mm$ (Ali, 2010)). Dans cette partie, la majorité de l'eau et de l'air circule sous l'action de la gravité. Ces pores (voir figure 1.7) qui sont libérés de leur eau suite au drainage et seront lieu de la circulation de l'air.

§2 Microporosité : C'est la partie des pores de faibles diamètres ($\phi \leq 0.06mm$ ((Ali, 2010)) qui retiennent l'eau après le drainage. Ils réagissent peu aux forces de la gravité mais sont le site des forces capillaires (voir figure 1.7).

§3 Facteurs influant la porosité : Les facteurs influant la porosité se résument en (Ali, 2010) :

- La texture du sol;
- La structure du sol;
- La teneur en matière organique;
- Le compactage du sol;
- Les pratiques agricoles qui réduisent la teneur en matière organique (ex., la culture continue réduira la structure granulaire du sol et réduira l'espace interstitiel);
- Le système racinaire des plantes (ex., la plantation les cultures à racines profondes auront tendance à améliorer la porosité).

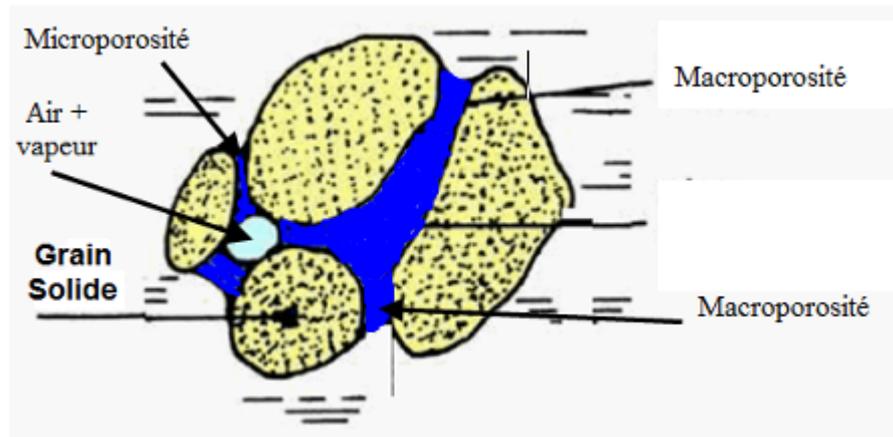


FIGURE 1.7 – La macroporosité et la microporosité

1.4.6 L'indice des vides

Le volume relatif des vides peut aussi être exprimé par l'indice des vides :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.6)$$

La relation entre l'indice des vides et la porosité peut être exprimée par :

$$e = \frac{p}{1 - p} \quad (1.7)$$

$$p = \frac{e}{1 + e} \quad (1.8)$$

1.4.7 Densité apparente

La densité apparente du sol est sa masse rapportée à l'unité du volume. Cette densité est un indicateur de la capacité de rétention de l'eau par le sol, la structure et la texture du sol, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, la compacité, l'aération et la porosité du sol. Il est bien noté qu'il y a une relation inversement proportionnelle entre la densité apparente du sol et sa porosité (Ali, 2010).

1.4.8 Couleur du sol

La couleur du sol indique des informations sur son origine, sa santé, sa teneur en matière organique (MO), son régime hydrique et sa dynamique de changement (Ali, 2010). La couleur du sol passe de blanc (ex., sol calcique) au noir (ex., la tourbe) passant par d'autres couleurs telles que marron, gris, ... etc. La couleur claire de la surface du sol signifie une faible teneur de la matière organique (MO) et/ou un sol sec, tandis que une couleur dense reflète une teneur élevée de la MO et/ou un régime hydrique humide. Aussi, la couleur peut indiquer la présence d'un élément spécifique dans le sol (ex., blanc indique la présence du calcaire, rouge, le fer, ... etc).

1.4.9 Pente du sol

La pente est un paramètre physique qui influe énormément sur le phénomène de ruissellement et l'eau sur la surface du sol et par conséquent son érosivité et sa capacité de rétention de l'eau. De plus, la pente est un facteur important à prendre en considération lors du choix des types de cultures et les techniques d'irrigation adéquates.

1.4.10 Profondeur du sol

La profondeur du sol se mesure de sa surface vers le bas (la couche arable plus le sous-sol). La profondeur du sol est importante pour les plantes, car des racines profondes signifie la nécessité d'une profondeur importante du sol à exploiter (alimentation en eau + nutriments des racines). Aussi, une profondeur du sol plus importante signifie un meilleur drainage, tant qu'il n'y a pas de couches imperméables dans le sous-sol (Ali, 2010).

TABLE 1.6 – Classification des sols en fonction de la profondeur (Ali, 2010, page 112)

| Classe | Profondeur (sous-sol) |
|--------------------|-----------------------|
| Très peu profond | <25cm |
| Peu profond | 25-50cm |
| Modérément profond | 50-75cm |
| Profond | >75cm |

D'autres propriétés physiques telles que, la vitesse d'infiltration, la réserve utile (RU), la réserve facilement utilisable (RFU) seront discutés dans le Chapitre 2.

1.5 Propriétés chimiques du sol

Elles se résument principalement en :

1.5.1 pH du sol

Le pH du sol mesure son acidité ou son alcalinité. Les origines derrière le pH du sol sont : les matériaux constituant le sol (depuis sa genèse), le climat, l'historique des cultures implantées, les pratiques agricoles notamment l'ajout des engrais et lessivage du sol. Le pH influe énormément le sol, notamment :

1. La solubilité des sels dans le sol et par conséquent sa fertilité ;
2. L'activité des micro-organismes et bactéries ;
3. La solubilité des métaux lourds et les activités de certains pesticides (Ali, 2010).

La valeur optimale du pH du sol varie dans l'intervalle $pH \in [6.0, 7.5]$. Néanmoins, il y a des plantes supportant des valeurs $pH \in [5.0, 8]$ (Verma et al., 2014).

- Si le sol est acide (pH faible), on peut augmenter son pH à travers l'ajout de d'autres minéraux basiques au début de l'hiver tels que : la chaux (chaulage), calcaire broyé, la craie, la dolomie ($MgCa(CO_3)_2$).

- Si le sol est basique (pH fort), son pH peut être réduit à travers l'épandage de la matière organique acide, d'humus, le fumier de bovin, soufre et des engrais verts. L'ajout de ces derniers (i.e., engrais verts) sert à cultiver des plantes à racines denses et profondes qui seront par la suite enfouies dans le sol dans le but de l'enrichir.

1.5.2 Capacité d'échange cationique (C.E.C)

Les cations (ions chargés positivement) constituent la majorité des nutriments dans le sol, telles que Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Zn^{2+} , Cu^{2+} et Mn^{2+} . Ces cations se trouvent dans la solution du sol et sont en échange dynamique avec celles fixées par la surface d'argile et la matière organique (MO) qui sont chargés négativement. L'argile et la matière organique (MO) forment un complexe absorbant appelé **complexe argilo-humique (C.A.H)** (Figure 1.8).

§1 **Remarque :** La solution du sol = ensemble constitué de l'eau du sol et des substances qui y sont dissoutes (Gobat et al., 2010).

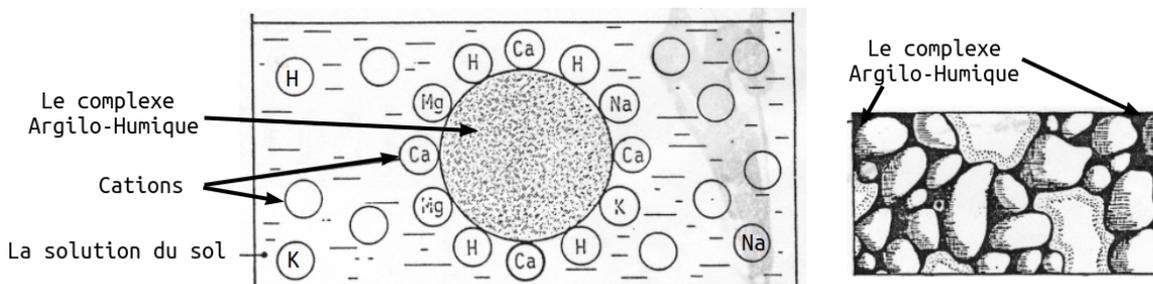


FIGURE 1.8 – Le complexe argilo-humique (CAH) et l'échange cationique (adaptée depuis Soltner (1992))

La capacité d'échange cationique (C.E.C) d'un sol est une mesure de la quantité de sites sur les surfaces du sol (argile + MO) qui peuvent retenir des ions chargés positivement par des forces électrostatiques. Par autre manière, c'est la capacité du sol de retenir les éléments nutritifs et de les empêcher de s'infiltrer au-delà des racines. En effet, la C.E.C caractérise la fertilité du sol qui est tributaire à la quantité d'argile + matière organique (MO) qui se trouve dans celui-ci (Ali, 2010). Il est important de noter que la C.E.C dépende du pH de la solution du sol (Duchaufour, 1998).

La C.E.C s'exprime généralement en ($meq/100g$, milliéquivalents d'élément par 100g de sol sec). En effet, $1meq/100g = 6.02 \times 10^{20}$ sites de fixation (ou d'échange) de cations (Ali, 2010).



La fixation (ou l'échange de cations) suit un ordre de préférence dépendant du type d'argile. Cependant, d'une manière générale, l'ordre suivant est respecté (MASSENET, 2012b) :

- Les cations : $Li < Na < Mg < Ca < Ba < Al < H...$;

— Les anions : $SO_4 > F > NO_3 > Cl > Br...$;

1.6 La matière organique

La matière organique (MO) nécessite une considération spéciale car elle évolue rapidement dans le temps par rapport aux minéraux et elle joue un rôle spécial dans le sol.

Les sources de la MO sont :

1. Les résidus de récolte,
2. Les fumiers (le fumier est une MO issue des déjections d'animaux mélangées à de la litière (paille, fougère, etc.)) utilisé comme fertilisant,
3. Les engrais verts,
4. et les racines des plantes mortes.

La MO est constituée d'une partie considérée stable qui se dégrade lentement et d'une partie plus facilement dégradable (par les bactéries + microorganismes).

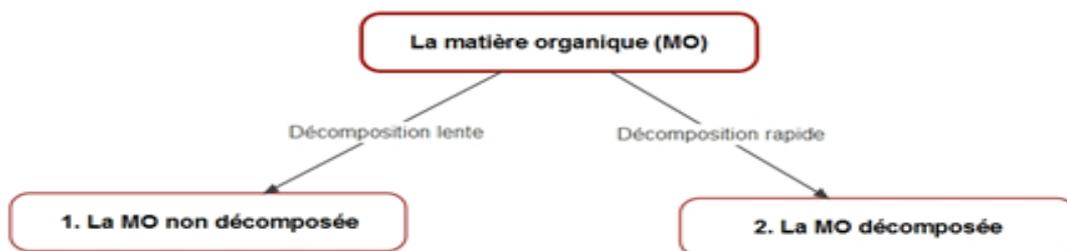


FIGURE 1.9 – Types de matières organiques

1.6.1 La matière organique (MO) non décomposée

- Elle favorise l'aération du sol et la circulation de l'eau.
- L'espace intracellulaire peut absorber l'eau et augmenter la capacité de rétention en eau.
- C'est la principale source de matériel pour les microorganismes et les petits animaux (verre de terre).
- C'est la principale source d'énergie pour les bactéries fixatrices d'azote.

1.6.2 La matière organique (MO) décomposée

- Elle est constituée d'une multitude de composés, notamment : les acides + la forme colloïdale.
- Les acides organiques enrobent (couvrent) les particules de sol, diminuent la mouillabilité des argiles, favorisent une meilleure agrégation des particules de sol, ce qui augmente la stabilité structurale et rend les sols plus résistants à l'érosion.
- La stabilité structurale favorise aussi la porosité et la circulation de l'eau.
- La matière colloïdale représente de grandes surfaces de fixation des anions et des cations, ce qui augmente la capacité d'échange cationique du sol.

1.7 Application

Attribuer la classe texturale aux sols suivants (Table 1.7).

TABLE 1.7 – Analyse granulométrique des sols

| Sol | % Sable | % Limon | % Argile |
|-----|---------|---------|----------|
| S1 | 50 | 25 | 25 |
| S2 | 20 | 40 | 40 |
| S3 | 30 | 50 | 20 |

Solution :

En utilisant le triangle de classification texturale des sol (Figure 1.10), les sols peuvent être classés comme suit (Table 1.8) :

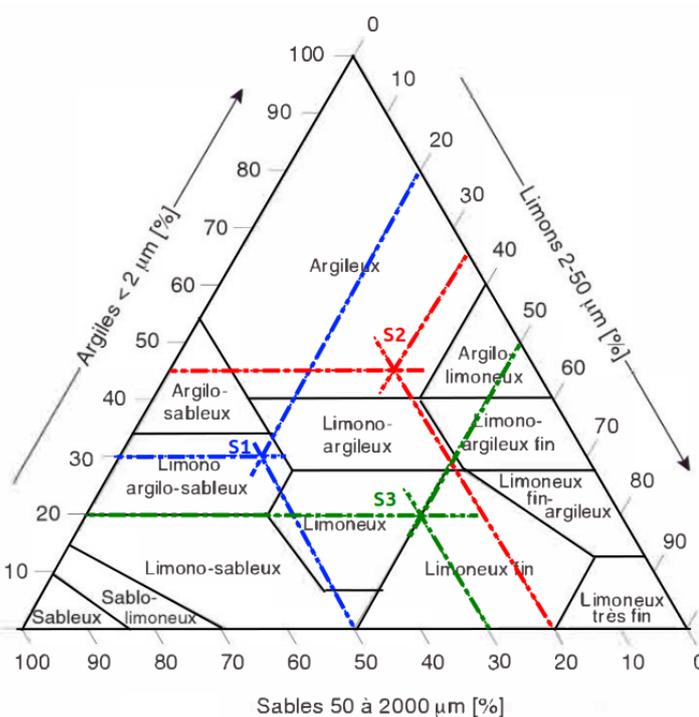


FIGURE 1.10 – Classification des sols au moyen du triangle de classification texturale

TABLE 1.8 – Classification texturale des sols

| Sol | % Sable | % Limon | % Argile | Classe texturale |
|-----|---------|---------|----------|------------------------|
| S1 | 50 | 25 | 25 | Limon argileux-sableux |
| S2 | 20 | 40 | 40 | Argile |
| S3 | 30 | 50 | 20 | Limon ou limon fin |

Chapitre 2

L'eau dans le sol

2.1 Introduction

La phase liquide du sol se constitue principalement de l'eau et des éléments en solution (sels, nitrates, ... etc.) dans celle-ci. Cette phase occupe une portion de l'espace des vides. L'eau contenue dans le sol est décrite par : 1) la teneur en eau, 2) les concepts de teneurs en eau caractéristiques et, 3) de profil d'humidité.

2.2 Les mouvements de l'eau dans le sol

Les principaux mouvements de l'eau dans le sol sont présentés sur la figure 2.1.

1. L'évapotranspiration dépend fortement du climat, notamment la température et l'humidité de l'air ;
2. Le ruissellement peut provoquer l'érosion du sol ;
3. La vitesse d'infiltration est nettement liée à la perméabilité du sol ;
4. La percolation (ou drainage) peut provoquer le lessivage du sol. Ce phénomène provoque le transport des sels solubles vers le sous sol et finalement vers les nappes.
5. La remontée des sels solubles peut être importante sous climat sec. Cependant, sous climat humide elle est négligeable ou absente (MASSENET, 2012a).

2.3 La teneur en eau

La quantité de liquide ou d'eau contenue dans le sol est variable dans le temps et dans l'espace. On distingue :

2.3.1 La teneur en eau volumique θ

Elle est définie comme le rapport du volume d'eau contenu dans le sol à son volume apparent de sol (ou volume total de sol). Elle est exprimée par :

$$\theta = \frac{V_e}{V_t} \quad (2.1)$$

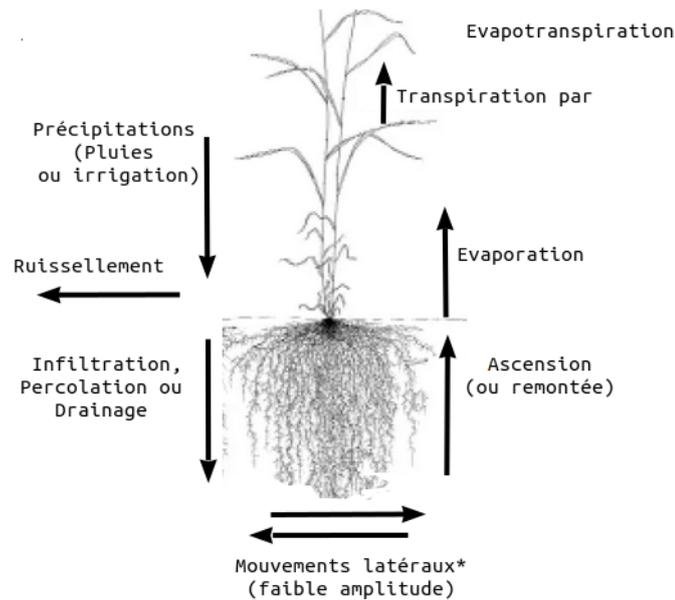


FIGURE 2.1 – Les mouvements de l'eau dans le sol

Tels que :

- V_e : volume d'eau contenu dans le sol ;
- V_t : volume apparent de sol.

2.3.2 La teneur en eau pondérale ω

Elle définie comme le rapport de la masse d'eau contenu dans le sol à la masse des particules de sol :

$$\theta = \frac{M_e}{M_s} \quad (2.2)$$

Tels que :

- M_e : la masse d'eau contenue dans le sol ;
- M_s : la masse solide du sol.

2.3.3 Les teneurs en eau caractéristiques

Les concepts d'humidités caractéristiques sont présenté à la figure 2.2 et ils sont aussi en relation avec l'utilisation de l'eau par la plante.

§1 Saturation (Sat) : En réalité, le sol n'atteint jamais la saturation complète dans le champ (conditions réelles), car une certaine quantité d'air reste toujours emprisonnée dans les pores (les vides) d'une part, et d'autre part il existe toujours une quantité d'eau qui s'infiltré vers les couches profondes du sol (sous sol) (cf. figure 2.2).

§2 Capacité au champ (CC) : L'humidité à la capacité au champ est la teneur en eau du sol après drainage de la quantité excédentaire (supplémentaire) et lorsque le régime d'écoulement

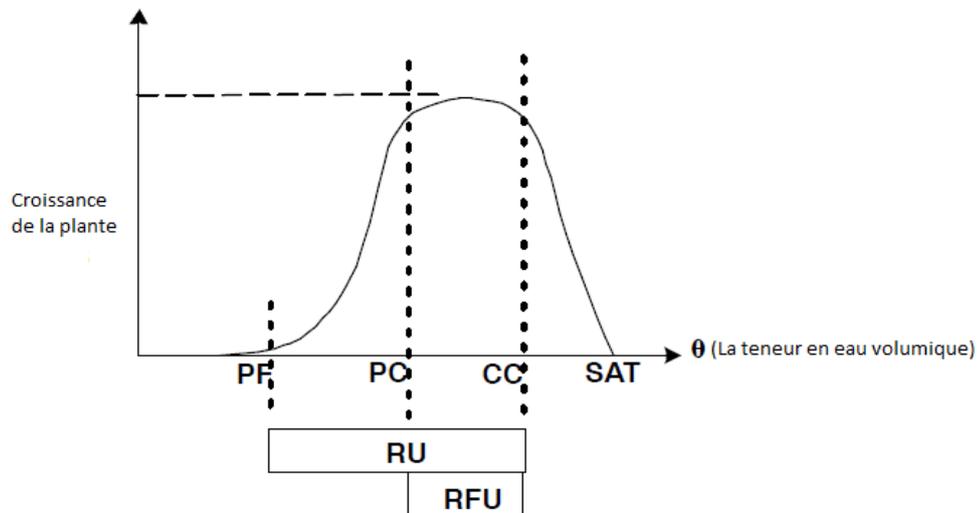


FIGURE 2.2 – Variation de la croissance des cultures (plantes) en fonction de l’humidité dans le sol (LAGACÉ, 2015)

vers le bas (le sous-sol) est devenu négligeable. L’humidité à la capacité au champ (CC) se produit généralement de un (01) à trois (03) jours après une pluie ou une irrigation (LAGACÉ, 2015).

§3 Point de flétrissement (PF) : C’est la teneur en eau du sol où la plante ne peut pas puiser (absorber) l’eau nécessaire à sa survie et son développement. A ce niveau d’humidité la plante subit des dégâts irréversibles et elle meure.

§4 Point critique (PC) : C’est la teneur en eau du sol lorsque la plante commence à souffrir d’un manque d’eau et que sa croissance est affectée. Cette teneur en eau est utilisée en gestion de l’irrigation. Elle est aussi appelée point de flétrissement temporaire (LAGACÉ, 2015).

2.4 La macro et la micro-porosité du sol

Les  tats et mouvements de l’eau dans le sol dépendent principalement à la macroporosité et la microporosité de ce dernier (le sol).

2.4.1 Macroporosité

Elle caractérise les pores dont le diamètre dépasse les 6   10 μm (micromètre) (MAS-SENET, 2012a). L’eau dans la macroporosité circule verticalement sous l’effet des forces de gravité uniquement. La macroporosité se vide après un drainage complet du sol. L’eau contenue dans la macroporosité participe légèrement à l’alimentation des plantes, car elle se vide rapidement (généralement dans les 24 heures qui suivent une irrigation ou précipitation). Les sols sableux sont caractérisés par une macroporosité importante et se vident (par drainage) rapidement après un irrigation.

2.4.2 Microporosité

La microporosité constitue la porosité capillaire, dans laquelle l'eau circule par capillarité. L'eau retenue dans ces pores constitue la principale source d'alimentation des plantes car elle peut durer plusieurs jours voir quelques semaines. Les sols argileux et limoneux par exemple, sont caractérisés par une microporosité importante. Ils peuvent emmagasiner l'eau pour des durées longues, cependant cette eau n'est pas facilement accessible pour les racines des plantes.

2.5 États de l'eau dans le sol

L'eau se trouve en trois (03) états dans le sol en fonction de la teneur en eau, à savoir (cf., figure 2.3) :

2.5.1 Eau de gravité (ou de saturation)

Cette eau occupe la macroporosité du sol, c-à-d., les vides volumineux. Elle est soumise aux forces de gravité (pesanteur). Après le drainage de l'eau de gravité, le sol atteint le taux d'humidité à la capacité au champ (HCC).

2.5.2 L'eau utilisable par la plante

C'est la partie de l'eau retenue par le sol soit :

1. à l'intérieur des pores capillaires fins ;
2. ou sous forme de films assez épais autour des éléments (particules) solides.

Cette partie est exploitable par les plantes jusqu'à atteindre le point de flétrissement permanent.

2.5.3 L'eau inutilisable par la plante

Elle forme des films très minces autour des grains solides ou entre dans la constitution des particules du sol. C'est la partie retenue par énergie électrique.

2.6 Forces agissant sur l'eau dans le sol

Il existe trois (03) forces agissant sur les particules de l'eau dans le sol :

1. La gravité \vec{P} ;
2. La succion des racines (ou radicules) \vec{S} ;
3. La succion de la matrice solide (particules solides du sol) \vec{F} .

La variation de ces trois forces est à l'origine des trois états de l'eau dans le sol (cf., figure 2.4).

- A chaque fois une particule liquide (de l'eau) s'éloigne par rapport à la matrice solide (grain ou particule terrestre) la force de succion de solide \vec{F} diminue (figure 2.4). Dans ce cas, la force la plus importante est celle de gravité \vec{P} , donc l'eau sera libre et s'écoule sous l'effet de gravitation (cf., figure 2.4).
- Lorsque la force de succion de la matrice solide égalise la force de gravitation ($\vec{F} = \vec{P}$), le point de ressuyage se produit et **l'humidité à la capacité au champ (HCC)**

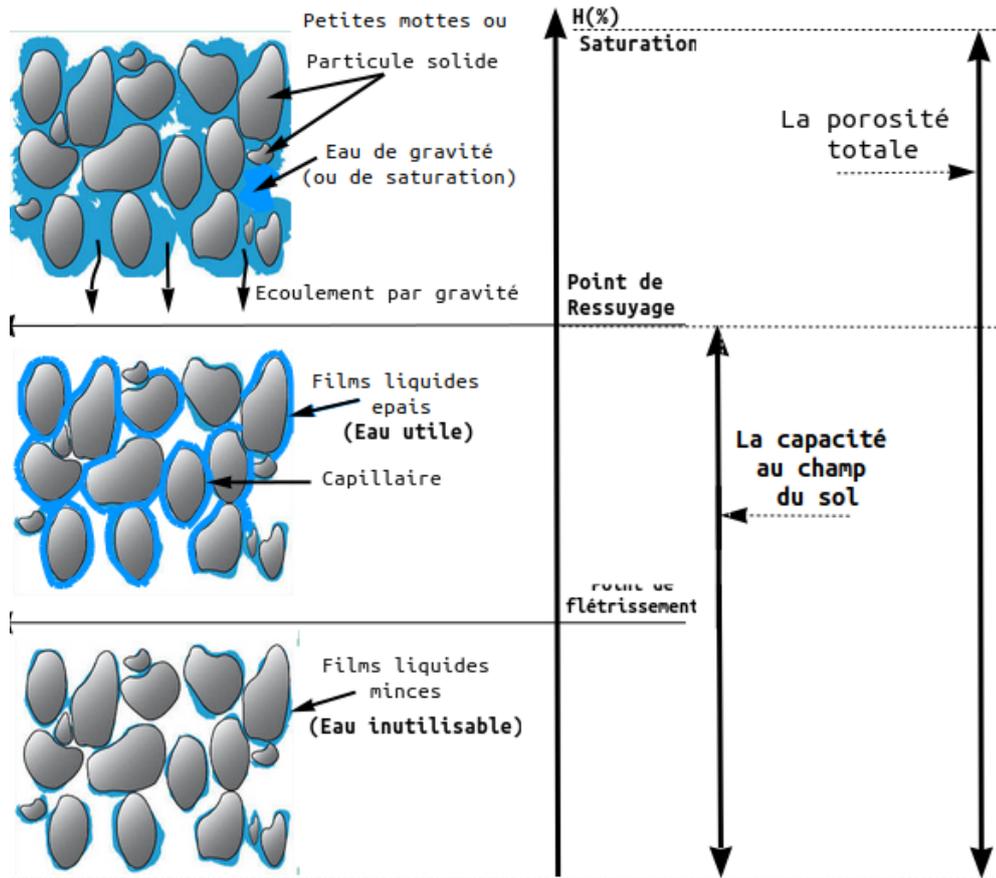


FIGURE 2.3 – États de l'eau dans le sol

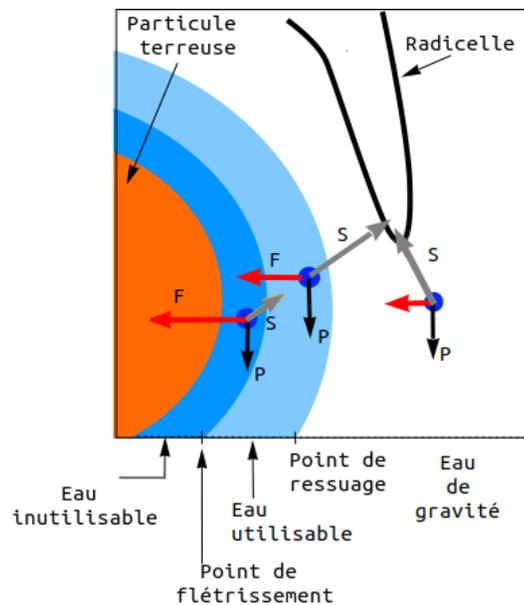


FIGURE 2.4 – Forces agissantes sur les particules de l'eau dans le sol

est atteint (cf., figure 2.4).

- Quant la force de succion (absorption) des racines \vec{S} soit supérieure aux autres forces $\vec{S} > \vec{P}$ et $\vec{S} > \vec{F}$, la plante absorbe l'eau dans le sol facilement (cf., figure 2.4).

- Lorsque la force de succion de solide soit supérieure aux autres forces (de pesanteur "gravité" $\vec{F} > \vec{P}$ et de succion des racines $\vec{F} > \vec{S}$), l'eau sera retenue par les particules solides du sol et l'absorption par les racines devient impossible. A ce niveau d'humidité **le point de flétrissement est atteint** (cf., figure 2.4).

2.7 La réserve de l'eau dans le sol

La teneur en eau dans le sol peut être exprimée encore par :

2.7.1 Réserve utile (RU)

C'est la quantité d'eau contenue dans le sol que la plante peut utiliser pour sa croissance (LAGACÉ, 2015). Cette quantité représente la différence entre l'humidité à la capacité au champ (HCC) et le point de flétrissement (HPF) (voir la figure 2.2).

La réserve utile se calcule par la formule suivante :

$$RU = \left(\frac{HCC(\%) - HPF(\%)}{100} \right) \times d_a \times Z \quad (2.3)$$

Tels que :

- RU : La réserve utile (en mm);
- HCC : L'humidité à la capacité au champ (en %);
- HPF : L'humidité au point de flétrissement (en %);
- d_a : La densité apparente du sol;
- Z : La profondeur d'enracinement (en mm).

2.7.2 Réserve facilement utilisable (RFU)

Elle définie par la quantité d'eau emmagasinée dans le sol que la plante peut l'utiliser facilement pour sa croissance et sans subir de stress hydrique dommageable (LAGACÉ, 2015) (voir la figure 2.2).

La réserve facilement utilisable (RFE) est une portion de la réserve utile (RU), et se calcule comme suit :

$$RFU = y \times RU = y \times \left(\frac{HCC(\%) - HPF(\%)}{100} \right) \times d_a \times Z \quad (2.4)$$

Tels que :

- RFU : La réserve facilement utilisable (en mm);
- y : facteur ≤ 1 , considéré généralement $y = \frac{2}{3}$.

Exemple : Étant donné un sol caractérisé par : une humidité à la capacité au champ (HCC) égale à 58%, une humidité au point de flétrissement égale 32%, densité apparente égale à 1.2. Il est demandé de calculer la réserve utile et la réserve facilement utilisable du sol pour une plante dont la profondeur des racines égale 45cm.

Solution :

$$RU = \left(\frac{HCC(\%) - HPF(\%)}{100} \right) \times d_a \times Z = \frac{58 - 32}{100} \times 1.2 \times 45 \times 10 = 140.4mm$$

$$RFU = y \times RU = 2/3 \times 140.4 = 93.6mm$$

2.8 La capillarité

Selon la loi de Jurin : "La force de rétention de l'eau dans le sol est inversement proportionnelle au diamètres des capillaires" (figure 2.5).

L'espace poreux (macro et microporosité) du sol peut être représenté schématiquement par la figure 2.5, où la microporosité.

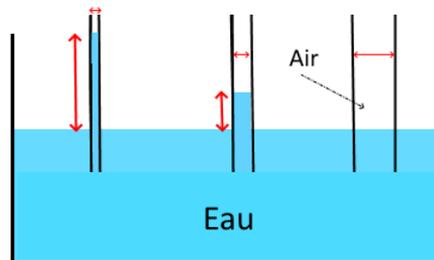


FIGURE 2.5 – Phénomène de capillarité ("remontée capillaire"))

Le potentiel capillaire exprime approximativement le potentiel matriciel.

2.9 Le potentiel matriciel

La teneur en eau de 15% représente approximativement la capacité de rétention d'un sol sablo-limoneux. Dans ce type de sol, la plante puise l'eau à cette teneur d'une façon normale. Cependant, à la même teneur (de 15%) d'un sol argileux, la plante commence à souffrir d'un stress hydrique. En effet, la notion de "Potentiel matriciel" est nécessaire pour définir le travail à exercer par les racines de la plante pour extraire l'eau retenue dans le sol en fonction de ce dernier (le sol).

D'une manière générale, une molécule d'eau est soumise à trois (03) potentiels, à savoir (Davet, 1996) :

1. Le potentiel gravitaire (négligeable), due à la pesanteur ;
2. Le potentiel osmotique (peu important), due à la force osmotique des racines ;
3. Le potentiel matriciel, due au forces capillaires de rétention de l'eau.

Le potentiel matriciel est une fonction de la pression capillaire, qui est la différence de pression entre l'eau dans les pores du sol et l'eau à la pression atmosphérique. Le potentiel

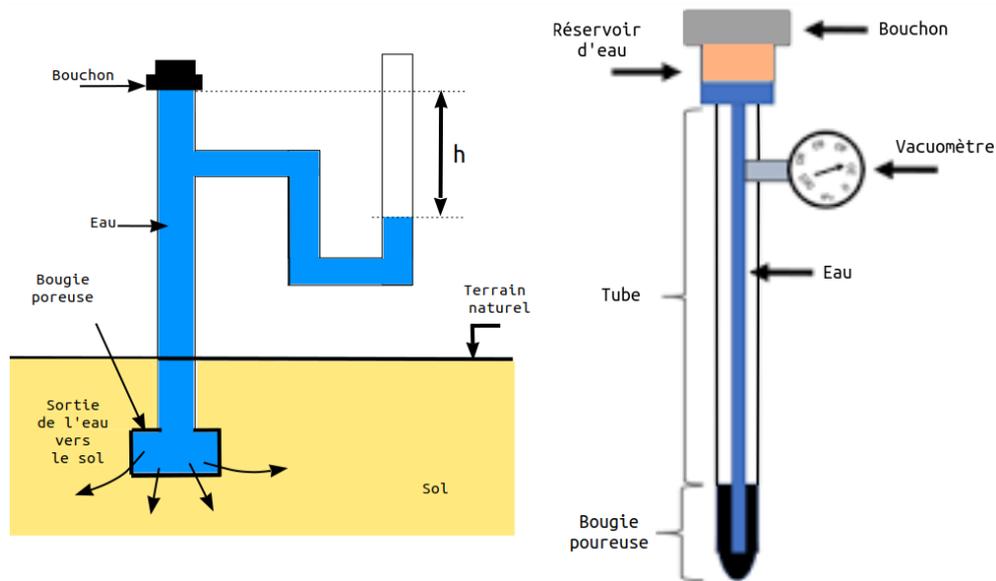


FIGURE 2.6 – Tensiomètre et son principe de fonctionnement

matriciel est de valeur négative et augmente à mesure que la teneur en eau du sol diminue. Plus le potentiel matriciel est négatif, plus le sol est sec.

Le potentiel matriciel se mesure in-situ au moyen de tensiomètre (Figure 2.6). Ce dernier est un instrument équipé d'une bougie poreuse que peut l'on enfoncer dans le sol après l'avoir rempli en eau. Si le sol n'est pas saturé, l'eau sort vers le sol sous l'effet de la succion exercée sur les particules de l'eau. Le déplacement de l'eau vers le sol se répercute en **dépression (hauteur "h"**, Figure 2.6, à gauche). Cette dépression "h" permet indirectement de mesurer l'état de l'humidité du sol.

TABLE 2.1 – Valeurs indicative de potentiel matriciel pF (adapté depuis Davet, 1996)

| pF | Valeur exprimée ($\times - 1$) en | | Valeur repère |
|------|-------------------------------------|-------|----------------------------------|
| | bar | MPa | |
| 1 | 0.01 | 0.001 | Sol saturé |
| 2 | 0.1 | 0.01 | |
| 3 | 1 | 0.1 | Capacité de rétention |
| 4 | 10 | 1 | |
| 4.2 | 16 | 1.6 | Point de flétrissement |
| 5 | 100 | 10 | |
| 5.8 | 650 | 65 | Limite de l'activité microbienne |

Le potentiel matriciel pF peut être utilisé pour exprimer l'état de l'humidité du sol.

$$pF = \text{Log}(0.15) - \text{Log}(r) \quad (2.5)$$

Tels que :

— r : rayon des capillaire (entre 0.2 à 6 μm).

La table 2.1 et la figure 12.7 dévoilent la relation entre les valeurs du potentiel matriciel et les valeurs caractéristiques de l'humidité du sol.

| Potentiel matriciel - Ψ^m (Pa), pF | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| Pa | 10^9 | 10^8 | 6.10^7 | 10^7 | $1.6 \cdot 10^6$ | 10^6 | 10^5 | 10^4 | 10^3 | 10^2 | 0 |
| pF | 7 | 6 | 5.78 | 5 | 4.2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | $-\infty$ |
| r cap. μm | | | $2.4 \cdot 10^{-3}$ | 14.610^{-3} | 0.09 | 0.146 | 1.46 | 14.6 | 146 | 1460 | ∞ |
| | <i>forces d'adsorption</i> | | | | <i>forces capillaires</i> | | | | | | |
| | H ₂ O/ Cations | liaisons hydrogène | | | | | | | | | |
| | | | | | Eau biodisponible pour les végétaux | | | | | | |
| | | | | Eau biodisponible pour les bactéries | | | | | | | |
| | | | Eau biodisponible pour les champignons | | | | | | | | |

FIGURE 2.7 – Signification des valeurs de potentiel matriciel (Calvet, 2003). r cap : rayon des capillaire

Deuxième partie

Irrigation

Chapitre 3

Évaluation des besoins en eau des plantes

3.1 Introduction

La première étape de l'établissement d'un projet d'irrigation consiste à déterminer **les besoins en eau des cultures**. Les données nécessaires peuvent être soit mesurées directement, ou calculées au moyen des des formules pré-établies.

Les objectifs de ce chapitre sont :

- Connaitre les différents facteurs influençant les besoins en eau des plantes ;
- Comprendre la méthodologie de calcul des besoins en eau des plantes.

3.2 Besoins en eau des cultures

3.2.1 L'évapotranspiration

L'évapotranspiration combine la perte d'eau par contenue dans le sol à travers deux (02) phénomènes naturels, à savoir (Allen et al., 1998) :

1. l'évaporation de l'eau à partir de la surface du sol,
2. la transpiration des plantes.

§1 Évaporation : C'est le processus par lequel l'eau liquide est convertie en vapeur d'eau et éliminée de la surface de vaporisation. L'eau s'évapore d'une variété des surfaces, les lacs, les rivières, les chaussées, les sols et la végétation humide.

§2 Transpiration : La transpiration est le processus de vaporisation de l'eau liquide dans les tissus de la plante à travers ces stomates vers l'atmosphère.

3.2.2 Définition besoins en eau des cultures

Les besoins en eau d'une culture sont défini comme **la hauteur d'eau (mm/j)** nécessaire pour **compenser l'évapotranspiration** d'une culture en bon état sanitaire, établie dans

un champ de grande superficie, dans des conditions de sol non limitantes (*de point de vue : disponibilité de l'eau et la fertilité du sol*) et conduisant au rendement cultural potentiel dans des conditions climatiques données d'environnement et de pratiques culturales.

Les sols cultivés consomment des quantités d'eau considérables sous forme de :

- Évaporation directe ;
- Prélèvement par les plantes :
 - Eau de constitution (une quantité négligeable constituant la matière organique),
 - Eau de transpiration.

Les besoins dépendent de :

- La plante elle-même (Type de culture) ;
- La phase de croissance de la plante ;
- Les conditions climatiques, telles que : la précipitation, l'humidité de l'air, la vitesse de vent, la turbulence de l'atmosphère, la durée d'exploitation au soleil (**l'ensoleillement**) et l'échanges radiant.
- La pédologie du sol (Type du sol).

3.2.3 L'évapotranspiration potentielle ou de référence (ET_0 ou ETP)

L'évapotranspiration potentielle ou de référence est définie comme "le niveau de l'évapotranspiration d'une surface importante d'un Gazon vert de hauteur uniforme entre 8cm à 15cm, en croissance active, recouvrant complètement le sol et alimenté en eau de façon non restrictive" (Vermeiren and Jobling, 1983b).

- Nous employons couramment le terme « ETP » pour désigner la valeur approchée de l'évapotranspiration potentielle obtenue par calcul à partir d'une formule d'estimation fondé sur des données climatiques.
- L'ETP est considérée comme une donnée climatique, c'est-à-dire que les facteurs culturaux n'interviennent pas dans son estimation.

3.2.4 Coefficient de culture (K_c)

Il est défini comme étant le rapport entre l'évapotranspiration maximale ETM d'une culture à l'évapotranspiration de référence ET_0 . ET_0 et ETM sont mesurées pour des grandes parcelles dans des conditions optimales de croissance.

Le K_c fait intervenir les paramètres culturels (le stade végétatif) de la plante aux paramètres climatiques. Il intègre les effets de trois caractéristiques primaires qui sont :

- La hauteur de la culture, qui affecte la rugosité et la résistance aérodynamique (résistance à l'air et au vent).
- L'âge, l'état de la feuille le degré de régulation stomatique et l'humidité de surface du sol.
- L'albédo (réflectivité) de la surface sol-végétation, qui dépend de la proportion de sol couvert par la végétation et de l'humidité du sol.

Le K_c est exprimé par un chiffre compris entre 0.5 et 1.25. Par exemple, le K_c de la tomate évolue comme ci-dessous.

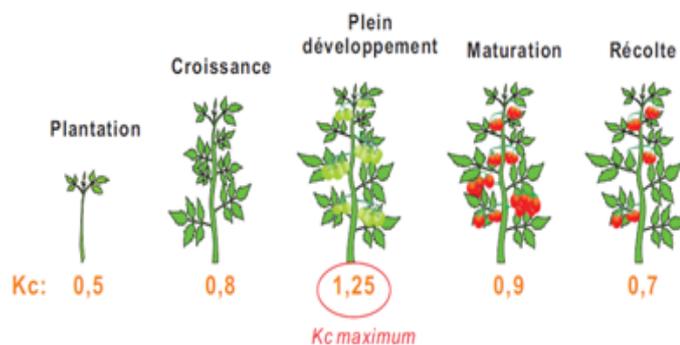


FIGURE 3.1 – Évolution du Kc de la Tomate en fonction de stade végétatif

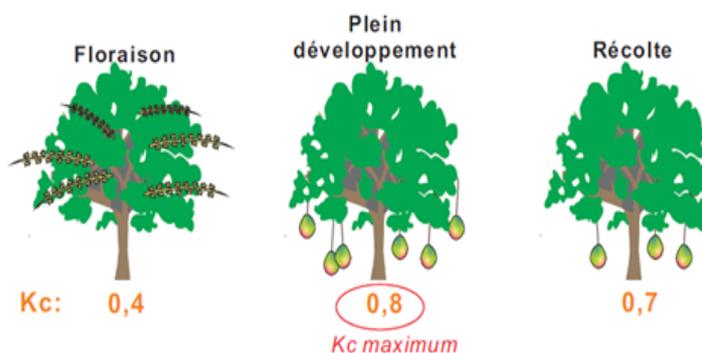


FIGURE 3.2 – Évolution du Kc d'un arbre fruité en fonction de stade végétatif

Le tableau 3.1 décrit les valeurs de K_c pour d'autres cultures en fonction du stade végétatif.

3.2.5 Évapotranspiration maximale ou de culture (ETM)

L'évapotranspiration maximale ETM d'une culture : c'est la quantité maximale d'eau qu'elle est susceptible d'évaporer lorsqu'elle "la plante" est placée dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ (HCC). Elle dépend de l'état de couverture du sol par la culture (taux de couverture du sol) et de l'état physiologique de la plante (phase de croissance active, phase de floraison, phase de maturation ... etc) (Tiercelin (2006), p.178).

[Autre définition] C'est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée à un stade végétatif donnée dans les conditions optimales de croissance. Exprimée par :

$$ETC = ETM = K_c * ET_0 \quad (3.1)$$

3.2.6 Évapotranspiration réelle (ETR) ou de culture (ETc)

C'est l'évapotranspiration d'une culture donnée à un stade végétatif donné dans les conditions réelles de croissance.

TABLE 3.1 – Variation du K_c pour quelques cultures (climat semi-humide, Humidité relative minimale $RH_{min} = 45\%$) (Tiercelin (2006), p.247)

| Culture | K_{c-ini} | K_{c-mid} | K_{c-end} | hauteur max du couvert (m) |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------|
| a.Légume | 0.7 | 1.05 | 0.95 | 0.4 |
| Carottes | | 1.00 | 0.70 | 0.3 |
| Chou, chou-fleur, brocoli | | 1.05 | 0.90 | 0.3-0.4 |
| Oignons récoltés secs | | 1.05 | 0.85 | 0.4 |
| Oignons récoltés verts | | 1.00 | 1.00 | 0.3 |
| Laitue | | 1.00 | 0.95 | 0.3 |
| b.Légumes (racines) | 0.5 | 1.10 | 0.95 | 0.5 |
| Betterave de table | | 1.05 | 0.95 | 0.4 |
| Navets | | 1.10 | 0.95 | 0.6 |
| c.Légumes (légumineuses) | 0.4 | 1.15 | 0.55 | 0.5 |
| Haricots verts | 0.50 | 1.05 | 0.90 | 0.4 |
| Pois chiches | | 1.15 | 0.35 | 0.8 |
| Lentilles | | 1.10 | 0.30 | 0.5 |
| Pois frais | | 1.15 | 1.10 | 0.5 |
| d.Céréales | 0.3 | 1.15 | 0.4 | |
| Orge | | 1.15 | 0.25 | 1 |
| Blé d'hiver | 0.7 | 1.15 | 0.25-0.4 | 1 |
| e.Arbre fruitiers | | | | |
| Amandier | 0.4 | 0.90 | 0.65 | 5 |
| Olivier | 0.65 | 0.70 | 0.70 | 3-5 |

$$ETR = K_s * ETM = K_s * K_c * ET0 \quad (3.2)$$

Avec :

— K_s : le coefficient de sécheresse.

Généralement :

$$ETR \leq ETM \quad (3.3)$$

Si les conditions de croissance sont optimales, alors :

$$ETR = ETM \quad (3.4)$$

3.2.7 Coefficient de sécheresse (K_s)

Exprime le rapport entre l' ETR et l' ETM . Il varie en fonction de la réserve d'eau dans le sol.

Avec :

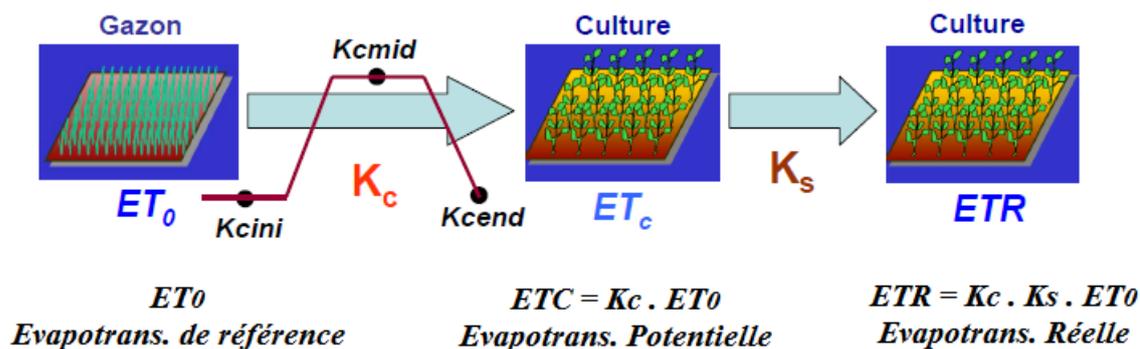
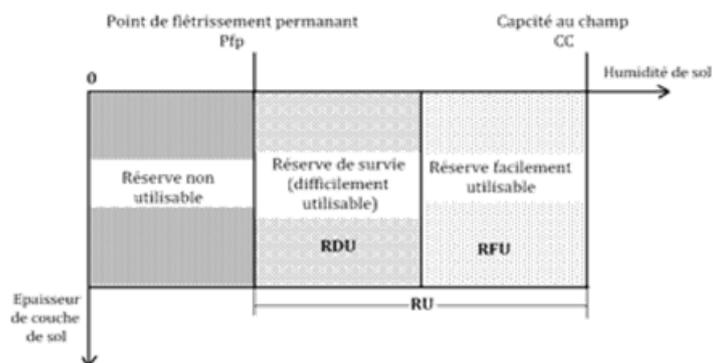
FIGURE 3.3 – Relations entre ET_0 , ETP et ETR (Modèle FAO-56).

FIGURE 3.4 – La réserve d'eau dans le sol.

- RU : la réserve utile (mm) ;
- RFU : la réserve facilement utilisable (mm) ;
- RDU : la réserve difficilement utilisable (mm) ;
- S : la quantité d'eau restante dans le sol à un moment (t) donné (mm).

Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est pleine (stockage S important), la plante pourra répondre à la demande climatique. L' ETR est égal approximativement l' ETM :

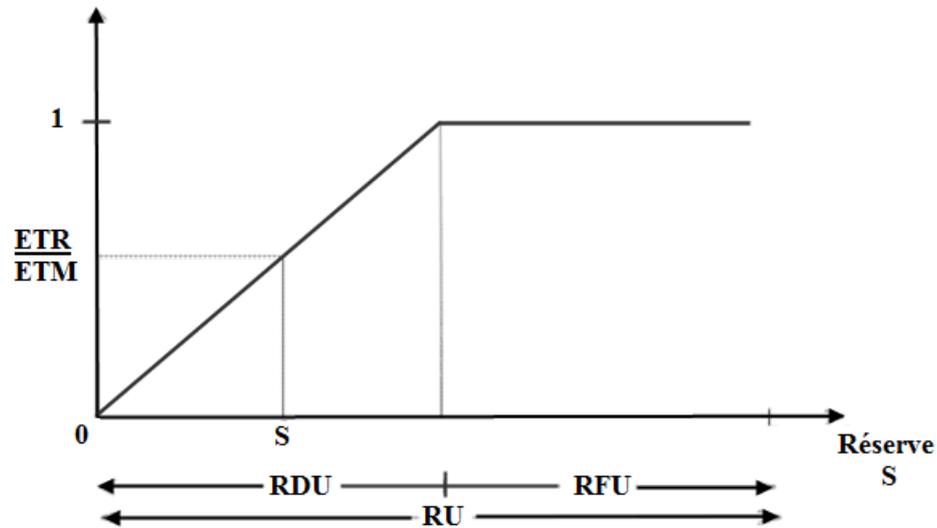
$$ETR = ETM \quad (3.5)$$

Lorsque la RFU est consommée (stockage S diminue), la plante puise dans la réserve difficilement utilisable (RDU) ; l'offre ne pouvant satisfaire la demande, la plante ferme partiellement ses stomates donc :

$$ETR < ETM \quad (3.6)$$

Le rapport entre la quantité d'eau S restante dans l'horizon du sol et RU est utilisé pour calculer le coefficient de sécheresse K_s et l'évapotranspiration réelle comme montre la figure précédente :

$$ETR = K_s * ETM \quad (3.7)$$

FIGURE 3.5 – K_s en fonction de la réserve d'eau dans le sol S

Tels que :

- $K_s = 1$, si $RDU \leq S \leq RU$.
- $K_s = S/RDU$, si $S < RDU$.

3.3 Méthodes d'évaluation de l'ETP

Soit on procède à la mesure de l'évaporation et la transpiration ou on utilise les formules du calcul :

3.3.1 Mesure de l'évaporation

L'instrument utilisé pour cela est le bac. Il est important d'implanter le bac dans des conditions climatiques les plus voisines possibles de celles du site.

§1 Bacs enterrés :

- **Bac de Young couvert** : de forme circulaire, de diamètre égal à 0.61 m et de profondeur 0.90m, couvert par une grille métallique.
- **Bac de l'O.R.S.T.O.M** : de forme carré de 1m de coté et de 0.6m de profondeur.

§2 Bacs posés sur le sol :

- **Bac de classe A** : il est de forme circulaire, de diamètre de 1.2m de diamètre de 0.25m de profondeur, en tôle galvanisée non peinte et posé sur le sol.

§3 Bac flottant : Il est le plus significatif lorsque'il s'agit de déterminer l'évaporation à partir d'un plan d'eau, mais son exploitation est particulièrement difficile (mesure du niveau de l'eau délicate, projection d'eau possible à l'intérieur ou l'extérieur du récipient).

En générale pour tirer l'évaporation réelle il faut :

$$E_v = E_b * C \quad (3.8)$$

Tels que :

- E_v : évaporation naturelle (mm).
- E_b : évaporation de bac (mm).
- C : coefficient de bac.

TABLE 3.2 – Valeurs de coefficient C pour différents types de bac

| Type de bac | Coefficient C |
|-------------|---------------|
| Young | 0.9 |
| Colorado | 0.83 |
| Classe A | 0.69 |

3.3.2 Mesure de la transpiration

Les procédés de mesure de la transpiration peuvent être classés en trois (03) catégories :

1. Mesure directe de la vapeur d'eau restituée à l'atmosphère.
2. Mesure du changement du poids de la plante et du terrain qui l'alimente.
3. Mesure de la quantité d'eau nécessaire à une plante pour assurer sa croissance et sa transpiration.

3.3.3 Calcul de l'évapotranspiration potentielle ou de référence ET_0 ou ETP

Plusieurs formules peuvent être utilisées, parmi lesquelles :

§1 Formule de PENMAN - MONTHEIT : Elle donnée par l'équation suivante (Allen et al., 1998) :

$$ETP = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{C}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3.9)$$

Avec :

$$\Delta = \frac{4098 \times e_s}{(T + 237.3)^2} = \frac{4098 [0.6108 \times \exp(\frac{17.25T}{T+237.3})]}{(T + 237.3)^2} \quad (3.10)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} \times P \quad (3.11)$$

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 \times Z_a}{293} \right)^{5.26} \approx 101.3 - 0.1055 Z_a \quad (3.12)$$

$$e_s(T) = 0.6108e^{\frac{17.27 \times T}{T+237.3}} \quad (3.13)$$

$$e_a(T_{pr}) = 0.6108e^{\frac{17.27 \times T_{pr}}{T_{pr}+237.3}} \quad (3.14)$$

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z_v - 5.42)} \quad (3.15)$$

Tels que :

- ETP : évapotranspiration de référence, en mm/j ou mm/h ;
- R_n : rayonnement global net en $MJ/m^2/j$ ou $MJ/m^2/h$;
- G : flux de chaleur échangé avec le sol $MJ/m^2/j$ ou $MJ/m^2/h$;
- Δ = pente de la courbe de pression de vapeur de saturation en $kPa/^\circ C$;
- γ : constante psychrométrique en $kPa/^\circ C$;
- $C = 900$ pour un pas de temps journalier et 37 pour un pas de temps horaire ;
- T : température moyenne journalière à une hauteur de 2m en $^\circ C$;
- T_{pr} : température du point de rosée en $^\circ C$ (voir la figure 3.6) ;
- P : pression atmosphérique en kPa ;
- Z_a : altitude de la zone par rapport à la mer (m) ;
- $e_s = e_s(t)$: la pression de vapeur saturante en kPa ;
- $e_a = e_a(T)$: pression de vapeur actuelle en kPa, $e_a = (\text{humidit relative} \times e_s)/100$;
- u_2 : vitesse du vent à 2 mètres du sol en m/s ;
- z_v : l'altitude à laquelle la vitesse de vent est mesurée.

Pour un calcul de pas journalier ($ETP = ETo$ en mm/j), la formule de Penman-Monteith sera (Eq.3.16) :

$$ETP(mm/j) = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3.16)$$

§2 Formule de PENMAN - MONTHEIT modifiée Pour une échelle de temps horaire, et un gazon bien irrigué, l'équation de Penman – Monteith FAO donne une Évapotranspiration de référence ETo .

$$ET_0(mm/j) = C * [W * R_n + (1 - W) * F(u) * (e_a - e_d)] \quad (3.17)$$

Avec :

- ET_0 : l'évapotranspiration de référence (mm/j) ;
- C : facteur de correction pour compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.
- W : Facteur de pondération rendant compte de l'effet de rayonnement à différente température et altitude ;
- R_n : Rayonnement net en évaporation équivalente, exprimé en (mm/j) ;

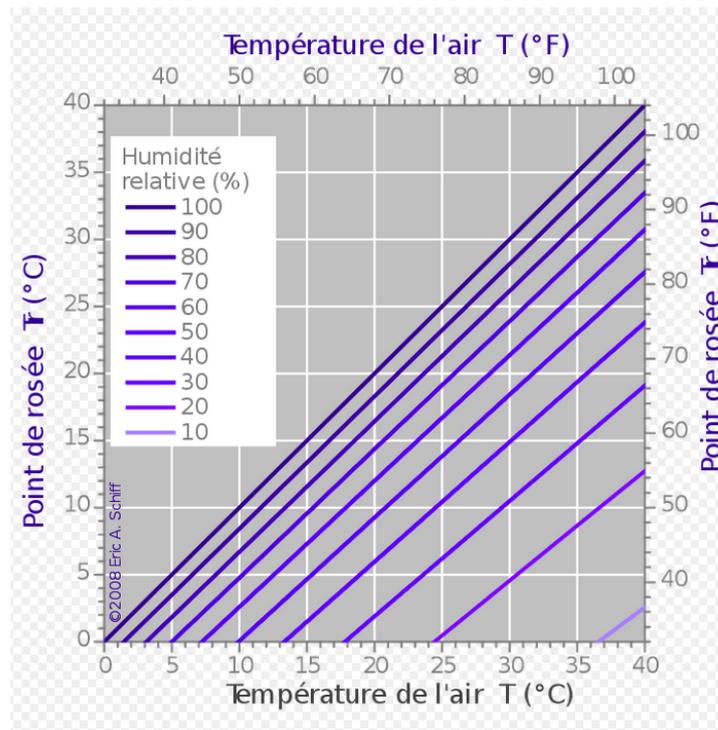


FIGURE 3.6 – Variation de la température du point de rosée en fonction de l'humidité et la température de l'air

- $F(u)$: Fonction liée au vent (valeur de la fonction du vent, d'après le parcours du vent (Km/jour) à une hauteur de 2 m) ;
- e_a : Tension de vapeur saturante à la température moyenne de l'air, en millibars ;
- e_d : Tension de vapeur réelle moyenne de l'air, exprimée en millibars. La différence constitue le facteur de correction, afin de compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

§3 Formule de BLANEY CRIDDLE : Elle donne des résultats satisfaisants pour les régions arides et semi aride, elle s'exprime par la formule suivante :

$$ETP = P * K * (0.457 * T + 8.13) \quad (3.18)$$

Avec :

- ETP : évapotranspiration potentielle en (mm/j) ;
- P : pourcentage de la durée mensuelle de l'éclairement rapporté à la durée annuelle et ne dépend que de latitude ;
- K : coefficient qui est en fonction de la culture et la zone climatique ;
- T : température moyenne mensuelle en C° .

§4 Formule de TURC : Si l'humidité relative de l'air est supérieure à 50%, alors :

$$ETP = 0.013 * J * (I_g + 50) * (T/(T + 15)) \quad (3.19)$$

Avec :

- ETP : en mm/mois ;
- J : nombre de jours dans le mois ;
- T : température moyenne de la période considérée en C° ;
- I_g : radiation globale du mois considéré (rayonnement solaire moyen) en (cal/cm²/j).

Si l'humidité relative de l'air est inférieure à 50% :

$$ETP = 0.013 * J * (I_g + 50) * (T/(T + 15)) * (1 + (\frac{50 - Hr}{70})) \quad (3.20)$$

Avec :

- Hr : l'humidité de l'air en %.

La radiation globale est calculé par :

$$I_g = I_gA * (0.18 + 0.62 * h/H) \quad (3.21)$$

Avec :

- I_gA : radiation maximale théorique ;
- H : durée astronomique de jour en heure/mois ;
- h : la durée d'insolation en heure/mois.

3.4 Application

Calculer l'évapotranspiration potentielle pour un périmètre irrigué situé à $36.00^\circ N$ et $4.5^\circ E$. La températures maximale au mois de juin = $T_{max} = 30.0^\circ C$ et minimale $T_{min} = 16.0^\circ C$. L'humidité relative de l'air est $H_r = 60\%$. La vitesse de vent mesurée à 3m d'altitude par rapport au surface du sol est $u_3 = 3.2m/s$. L'altitude de la région est égale à $Z_a = 1000mNGA$.

Calculer l'évapotranspiration maximale journalière pour une plante A, si son coefficient culturel $K_c = 1.12$, puis l'évapotranspiration réelle journalière pour un coefficient de sécheresse $K_s = 0.85$.

Solution : En se basant sur la formule 3.16 rétablie ci-après :

$$ETP(mm/j) = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

§1 La température moyenne T_{moy} :

$$T_{moy} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} = \frac{30.5 + 16.5}{2} = 23^\circ C \quad (3.22)$$

§2 La pente de la courbe de pression de vapeur de saturation Δ :

$$\Delta = \frac{4098[0.6108 \times \exp(\frac{17.25T}{T+237.3})]}{(T + 237.3)^2} = \frac{4098[0.6108 \times \exp(\frac{17.25 \times 23}{23+237.3})]}{(23 + 237.3)^2} = 0.170kPa/^{\circ}C \quad (3.23)$$

§3 La constante psychrométrique γ :

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 \times Z_a}{293} \right)^{5.26} = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 \times 1000}{293} \right)^{5.26} = 90.02kPa \quad (3.24)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} \times P = 0.665 \times 10^{-3} \times 90.02 = 0.060kPa/^{\circ}C \quad (3.25)$$

§4 La pression de vapeur actuelle (journalière) e_a : Elle peut être calculée à la base de la température du point de rosée T_{pr} . En se basant sur la figure 3.6, la température du point de rosée pour une humidité relative de $H_r = 60\%$ et température de l'aire $T_{moy} = 23^{\circ}C$:

$$H_r = 60\% \text{ et } T_{moy} = 23^{\circ}C \Rightarrow T_{pr} = 16^{\circ}C \quad (3.26)$$

$$e_a(T_{pr}) = 0.6108e^{\frac{17.27 \times T_{pr}}{T_{pr}+237.3}} = 0.6108e^{\frac{17.27 \times 16}{16+237.3}} = 1.82kPa \quad (3.27)$$

§5 La pression de vapeur saturante e_s :

$$e_s = \frac{e_{s,T_{min}} + e_{s,T_{max}}}{2} \quad (3.28)$$

avec :

$$e_s(T_{min}) = 0.6108e^{\frac{17.27 \times T_{min}}{T_{min}+237.3}} = 0.6108e^{\frac{17.27 \times 16}{16+237.3}} = 1.82kPa \quad (3.29)$$

$$e_s(T_{max}) = 0.6108e^{\frac{17.27 \times T_{max}}{T_{max}+237.3}} = 0.6108e^{\frac{17.27 \times 30}{30+237.3}} = 4.24kPa \quad (3.30)$$

donc :

$$e_s = \frac{e_{s,T_{min}} - e_{s,T_{max}}}{2} = \frac{1.82 + 4.24}{2} = 3.03kPa \quad (3.31)$$

§6 La radiation net R_n :

$$R_n = R_{nS} - R_{nL} \quad (3.32)$$

Tels que :

— R_{nS} : la radiation net à ondes courtes ($MJm^{-2}jour^{-1}$);

- R_{nL} : la radiation net à ondes longues ($MJm^{-2}jour^{-1}$).
- La radiation extraterrestre journalière R_a peut être tirée de la **table 2.6** (Annexes) en fonction de la latitude de la région.

$$Latitude = 36^\circ, mois = juin \Rightarrow R_a = 41.7 \text{ MJ} \times m^{-2} \times jour^{-1}.$$

- La radiation des ondes longues R_{nL} :

$$R_{nL} = \sigma \left(\frac{T_{min}^4 + T_{max}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left[1.35 \left(\frac{R_s}{R_{so}} \right) - 0.35 \right] \quad (3.33)$$

Tel que $\sigma = 4.901 \times 10^{-9}$, T_{min} et T_{max} en Kelvin.

Le rayonnement solaire d'un ciel claire R_{so} :

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} Z_a) \times R_a = (0.75 + 2 \times 10^{-5} \times 1000) \times 41.7 = 32.109 \text{ MJ}m^{-2}jour^{-1} \quad (3.34)$$

Le rayonnement solaire à ondes courtes R_s :

$$R_s \cong 0.55R_a = 0.55 \times 41.7 = 22.935 \text{ MJ}m^{-2}jour^{-1} \quad (3.35)$$

Le ratio $R_s/R_{so} \in [0.3, 1]$. Si $R_s/R_{so} < 0.3$ alors $R_s/R_{so} = 0.3$ et si $R_s/R_{so} > 1$ alors $R_s/R_{so} = 1$ (Waller and Yitayew, 2015). Dans ce cas nous avons :

$$\frac{R_s}{R_{so}} = \frac{22.935}{32.109} = 0.71 \quad (3.36)$$

En effet,

$$R_{nL} = 4.901 \times 10^{-9} \left(\frac{(16 + 273)^4 + (30 + 273)^4}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{1.82}) [1.35 \times 0.71 - 0.35]$$

$$R_{nL} = 3.47 \text{ MJ}/(m^{-2}jour^{-1})$$

- La radiation net des ondes courtes R_{nS} :

$$R_{nS} = 0.77R_s = 0.77 * 22.935 = 17.66 \text{ (MJ}m^{-2}jour^{-1}) \quad (3.37)$$

En utilisant l'équation 3.32 :

$$R_n = R_{nS} - R_{nL} = 17.66 - 3.47 = 14.19 \text{ MJ}m^{-2}jour^{-1}$$

§7 La vitesse de vent à 2m d'altitude :

$$\begin{aligned} u_2 &= u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \\ z &= 3m; u_3 = 3.2m/s \\ u_2 &= 3.2 \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 3 - 5.42)} = 2.95m/s \end{aligned} \quad (3.38)$$

§8 L'évapotranspiration ETP :

$$ETP(mm/j) = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Considérant le flux de chaleur échangé avec le sol $G = 0 MJ/m^2/j$:

$$ETP(mm/j) = \frac{0.408 \times 0.170 \times (14.19 - 0) + 0.060 \frac{900}{23+273} 2.95(3.03 - 1.82)}{0.170 + 0.060(1 + 0.342.95)} = 2.21 mm/jour$$

§9 L'évapotranspiration maximale ETM de la plante A :

$$ETM = K_c \times ETP = 1.12 \times 2.21 = 2.48 mm/jour \quad (3.39)$$

§10 L'évapotranspiration réelle ETR de la plante A :

$$ETM = K_s \times K_c \times ETP = K_s \times ETM = 0.85 \times 2.48 = 2.11 mm/jour \quad (3.40)$$

Chapitre 4

Les besoins en eau d'irrigation

4.1 Introduction

La deuxième étape principale dans la conception des réseaux d'irrigation consiste à déterminer les besoins en eau d'irrigation.

Les pluies, (en particulier leur part efficace), fournissent une partie de l'eau requise pour satisfaire les besoins d'évapotranspiration des cultures. Le sol, agissant comme un tampon, stocke une partie de l'eau de pluie et la restitue aux cultures en période de déficit. Sous des climats humides, ce mécanisme suffit pour assurer une croissance satisfaisante dans des systèmes de culture sans irrigation. Dans des conditions arides ou en cas de saison sèche prolongée, il est nécessaire d'irriguer pour compenser le déficit d'évapotranspiration (transpiration des cultures et évaporation à partir du sol) dû à l'insuffisance ou à l'irrégularité des précipitations.

4.2 Les besoins en eau d'irrigation

4.2.1 Définition

La consommation d'eau pour l'irrigation est définie comme étant le volume d'eau nécessaire pour compenser le déficit entre d'une part l'évaporation potentielle et d'autre part les pluies efficaces pendant la période de croissance des cultures et le changement dans la teneur en eau du sol. Elle varie considérablement en fonction des conditions climatiques, des saisons, des cultures et des types de sol.

Pour un mois donné, le bilan hydrique des cultures peut s'exprimer comme suit :

$$I = (P + R) - (ETR + D) \quad (4.1)$$

Avec :

- I : l'Irrigation nécessaire pour satisfaire la demande des cultures (mm) ;
- P : Pluie (mm) : "Ressource en eau" ;
- R : Réserve du sol + Remontée capillaire (mm) : "Ressource en eau" ;
- ETR : Évapotranspiration réelle : "Demande en eau de culture" ;
- D : Ruissellement, drainage,... (mm) : "Pertes".

1. Si le bilan est positif ($I \geq 0$), les pluies sont suffisantes, donc l'irrigation est inutile ;
2. Si les pluies sont inexistantes, toute l'eau est apportée par irrigation :

$$I = ETR \quad (4.2)$$

3. Si une partie de besoin est fournie par la pluie et le reste par irrigation, les besoins en eau d'irrigation seront :

$$I = ETR - (P + R) \quad (4.3)$$

4.3 Évaluation des besoins nets d'irrigation

Ces besoins sont calculés à partir de la formule suivante :

$$B_{net} = ETR - (x * RFU + P_{eff}) \quad (4.4)$$

Avec :

- B_{net} : le besoin net en eau d'irrigation (mm) ;
- ETR : l'évapotranspiration de la culture considérée (mm) ;
- x : coefficient compris entre (0 – 1) correspondant au pourcentage d'utilisation de RFU, compte tenue de la profondeur d'enracinement.
- P_{eff} : la pluie efficace (mm/mois).

4.3.1 Calcul de pluie efficace

C'est la partie des précipitations totales qui est directement et/ou indirectement utile pour les cultures.

$$P_{eff} = \alpha * P_{80\%} \quad (4.5)$$

- α : Fraction donnée pour tenir compte des pertes par ruissellement et par percolation. Elle varie entre (10 – 20%) : $\Rightarrow \alpha = (0.8 \text{ à } 0.9)$.
- $P_{80\%}$: Pluie en (mm/mois) de probabilité de dépassement de 80%.

4.4 Efficience d'irrigation

Les besoins bruts du périmètre, dépendent de l'efficacité de l'irrigation, c'est à dire des pertes d'eau qui se produisent à partir du point du captage jusqu'à la satisfaction des besoins du rapport plante/sol.

L'efficacité d'un réseau d'irrigation est définie par le rapport entre le besoin d'eau strictement nécessaire à la culture et le volume d'eau à introduire dans ce réseau. La différence entre les deux volumes indique les pertes, qui devront être limitées afin d'éviter le gaspillage.

L'efficacité de l'irrigation peut être déterminée par :

$$E_i = E_t \times E_d \times E_u \quad (4.6)$$

Telles que :

- E_i : Efficacité d'irrigation en % ;
- E_t : Efficacité de transport (adduction) en % ;
- E_d : Efficacité de type de distribution en % ;
- E_u : Efficacité de l'uniformité de la distribution en %.

4.4.1 Efficacité de transport E_t

Le transport (adduction) est le trajet parcouru par l'eau du point de prélèvement (barrages, réservoirs, puits, etc. . .), au point de livraison à la parcelle (borne ou prise).

4.4.2 Efficacité de distribution E_d

Elle dépend de la méthode d'irrigation adoptée à la parcelle (irrigation par submersion, ruissellement, par aspersion, localisée,...etc). Elle varie généralement entre (40 à 80%)

4.4.3 Efficacité de l'uniformité E_u

C'est la livraison égale, par une quantité d'eau optimale en tout point de la superficie irriguée, ce qui se produit très rarement. Pour assurer une bonne répartition, il faudra apporter un volume supérieur, dont l'excédent par rapport à la quantité nécessaire se traduit par une perte.

4.5 Évaluation des besoins bruts d'irrigation

Tenant compte le rendement "efficacité" du réseau d'irrigation, les besoins bruts à assurer à partir de la source d'eau sont définis comme suit :

$$B_{brut} = \frac{B_{net}}{E_i} = \frac{B_{net}}{E_t \times E_d \times E_u} \quad (4.7)$$

Tel que :

- B_{brut} : Besoin en eau brut d'irrigation.

4.6 Doses et fréquence d'arrosage

4.6.1 Dose pratique d'arrosage

Elle correspond à la partie facilement utilisable de l'eau retenue dans les sol (Eq.4.8) :

$$D_p = RFU \times 10 \quad (m^3/ha) \quad (4.8)$$

4.6.2 Fréquence d'arrosage

C'est le nombre d'opérations d'irrigation par mois.

$$n = \frac{B_{net}}{D_p} \quad (\text{opérations/mois}) \quad (4.9)$$

Si n n'est pas un nombre entier, on devra choisir la valeur arrondie la plus commode à la rotation d'arrosage. En effet, la dose réelle est à calculer à la base de la nouvelle valeur de

n .

4.6.3 Dose réelle d'arrosage

$$D_r = \frac{B_{net}}{n} \quad (m^3/ha) \quad (4.10)$$

Tel que n est la fréquence d'arrosage (nombre entier, ex., 1, 2, 3, ... etc).

4.7 Débit spécifique et débit caractéristique

4.8 Débit spécifique

Le débit spécifique est défini d'après le besoin net de chaque culture dans un champ irrigué. Il est donné par la formule suivante :

$$q_{sp} = \frac{B_{net}}{3.6 \times T \times t \times E_i} \quad (4.11)$$

Tels que :

- q_{sp} : Débits spécifique ($l/s/ha$)
- B_{net} : Besoins mensuels maximum net en m^3/ha ;
- T : Temps d'irrigation par jour (ex., 10h, 15h, 20h, ... etc);
- t : Durée d'irrigation en jours par mois (ex., 10jours, 20jours, 25jours, ...etc);
- E_i : efficience globale du système d'irrigation.

Si plusieurs espèces de cultures sont à irriguer par un réseau commun, le **débit de pointe** pris en considération pour le calcul hydraulique des conduites du réseau est celui de la culture la plus exigeante, relatif au mois dont le besoin net est maximal.

4.8.1 Débit caractéristique

Le calcul de débit caractéristique permet de définir le débit maximum que le système d'irrigation doit fournir pour irriguer chaque parcelle. Ce débit est obtenu par la formule suivante :

$$Q = q_{sp,max} \times S_{utile} \quad (4.12)$$

Tels que :

- Q : Débit caractéristique (l/s);
- $q_{sp,max}$: Débit spécifique de pointe de la plante la plus exigeante ($l/s/ha$);
- S_{utile} : Surface agricole utile du secteur (ha).

4.9 Application

Un périmètre d'irrigation se situe dans une zone caractérisée par une perte de précipitation par ruissellement et évaporation est égale à 20%. Le sol se caractérise par une humidité

à la capacité au champ (HCC) égale à 40% et une humidité au point de flétrissement (HPF) égale à 27%. La densité apparente du sol est égale à 1.2 et la profondeur maximale de la couche cultivable est égale à 1.50m.

Sachant que les efficacités des systèmes de transport et de distribution, ainsi l'uniformité d'irrigation sont : 95%, 80%, et 75% respectivement.

Pour l'évapotranspiration potentielle, on prend la valeur calculée à la fin de l'application (Section 3.4) du chapitre précédent.

1. Calculer le besoin net d'irrigation pour la phase d'arrière-saison (mois de juin), sachant que 80% de la réserve facilement utilisable doit être remplie à chaque opération d'irrigation.
2. Calculer le besoin brut d'irrigation pour pour la phase d'arrière-saison.
3. Calculer le volume d'eau dans ce cas, si la superficie du périmètre est de 14 Ha.
4. Calculer la dose pratique, la fréquence et la dose réelle d'arrosage.
5. Calculer le débit spécifique si l'irrigation est opérée 22 jours/mois et pendant 18 heures/jour.
6. Calculer le débit caractéristique si la surface utile du périmètre est égale à 13.8ha.

Les données du calcul sont mentionnées dans le tableau 4.1 ci-après :

TABLE 4.1 – Données climatiques et culturelles

| Mois | Mars | Avril | Mai | Juin |
|--|----------|------------|-----------|----------------|
| Phase de développement | Initiale | Croissance | Mi-saison | Arrière-saison |
| Durée (jours) | 31 | 30 | 31 | 30 |
| Précipitation de fréquence 50% (mm/mois) | 50.02 | 39.19 | 27.14 | 4.58 |
| Précipitation de fréquence 80% (mm/mois) | 34.15 | 27.56 | 18.54 | 3.22 |
| Coefficient culturel K_c | 0.5 | 0.95 | 1.1 | 0.90 |
| Profondeurs racinaires (m) | 0.20 | 0.45 | 0.55 | 0.55 |

Solution :

1. Calcul du besoin net mensuel d'irrigation pour la phase d'arrière-saison :

$$B_{net} = ETR - (x \times RFU + P_{eff}) \quad (4.13)$$

— L'évapotranspiration réelle ETR :

Pour dimensionner un réseau d'irrigation, on prend $K_s = 1$.

$$ETR = K_s \times ETM = K_s \times K_c \times ET_o(mm/j) \times Nbr.Jours \quad (4.14)$$

$$ETR = 1 \times 0.90 \times 2.21 \times 30 = 59.67mm/mois$$

— La réserve facilement utilisable RFU :

$$RU = \frac{(Hcc\% - Hpf\%)}{100} \times da \times ZRU = \frac{(40\% - 27\%)}{100} \times 1.2 \times 0.55 \times 1000 = 85.5mm \quad (4.15)$$

donc :

$$RFU = 2/3RU = 2/3 \times 85.5 = 57.2mm \quad (4.16)$$

— La pluie efficace P_{eff} :

$$\begin{aligned} P_{eff} &= \alpha \times P_{80\%} = P_{80\%} - Pertes \\ P_{eff} &= P_{80\%} - \frac{20}{100}P_{80\%} = (1 - 0.2)P_{80\%} = 0.8 \times P_{80\%} \\ P_{eff} &= 0.8 \times 3.22 = 2.58mm \end{aligned} \quad (4.17)$$

En effet :

$$B_{net} = 59.67 - \left(\frac{100 - 80}{100} \times 57.2 + 2.58 \right) = 45.65mm/mois$$

2. Calcul du besoin brut mensuel d'irrigation pour la phase d'arrière-saison :

$$\begin{aligned} B_{brut} &= \frac{B_{net}}{E_i} = \frac{B_{net}}{E_t \times E_d \times E_u} \\ B_{brut} &= \frac{45.65}{0.95 \times 0.80 \times 0.75} = 80.09mm/mois \end{aligned} \quad (4.18)$$

3. Calcul du volume d'eau correspondant au besoin brut :

$$\begin{aligned} V &= B_{brut} \times S \times 10(m^3) \\ V &= 80.09 \times 14 \times 10 = 11212.28m^3 \end{aligned} \quad (4.19)$$

4. Calcul de la dose pratique, la fréquence et la dose réelle d'arrosage.

— La dose pratique d'arrosage D_p :

$$D_p = RFU \times 10 (m^3/ha) = 57.2 = 572(m^3/ha) \quad (4.20)$$

5. La fréquence d'arrosage n :

$$n = \frac{B_{net}}{D_p} (\text{opération/mois}) = \frac{45.65 \times 10}{572} = 0.8 \rightarrow n = 1 \quad (4.21)$$

6. Calcul de la dose réelle d'arrosage D_r :

$$D_r = \frac{B_{net}}{n} (m^3/ha) = 45.65 \times 10/1 = 456.5(m^3/ha) \quad (4.22)$$

7. Calcul du débit spécifique q_{sp} :

$$\begin{aligned} q_{sp} &= \frac{B_{net}}{3.6 \times T \times t \times E_i} \\ q_{sp} &= \frac{45.65 \times 10}{3.6 \times 18 \times 22 \times (0.95 \times 0.80 \times 0.75)} = 0.56l/s/ha \end{aligned} \quad (4.23)$$

8. Calculer du débit caractéristique Q :

$$\begin{aligned} Q &= q_{sp,max} \times S_{utile} \\ Q &= 0.56 \times 13.8 = 7.73l/s \end{aligned} \quad (4.24)$$

Chapitre 5

Irrigation de surface

5.1 Introduction

L'irrigation de surface couvre **l'ensemble des techniques d'irrigation où l'eau disponible en tête de parcelle se répartie sur le terrain à irriguer par un écoulement gravitaire** (i.e, écoulement de surface). Cette méthode d'irrigation ne nécessite que l'aménagement adéquat du sol.

On distingue 03 types à savoir :

1. Irrigation par bassins ;
2. Irrigation par sillons (à la raie) ;
3. Irrigation par planches (ou par ruissellement).

5.2 Irrigation par bassins

Cette méthode consiste à introduire la dose d'arrosage à l'intérieur de planches horizontales bordées par des diguettes formant des bassins de submersion (figure 5.1).

5.2.1 Dimensionnement et aménagement du sol

- Les bassins sont constitués de cuvettes en terre, à fond à peu près plat, entourées de diguettes de faible hauteur (figures 5.1 & 5.2).
- Pour obtenir une bonne uniformité d'irrigation, le temps de remplissage des bassins doit être suffisamment long (irrigation relativement lente) en fonction de la perméabilité du sol (la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol).
- Le sol doit être aménagé soigneusement pour avoir des faibles pentes, généralement $i \leq 2.5(\%)$.
- Les diguettes peuvent être établies en suivant les courbes de niveau (figure 5.1).
- Dans le même bassin, on peut tolérer une différence de niveau (dénivelée max) entre 5cm à 8cm, donc des bassins relativement plats.
- En fonction de pente du terrain et de dénivelée maximale, les largeurs des bassins peuvent être calculées. Par exemple, pour une dénivelée maximale dans le même

bassin égale à 8cm et une pente du terrain égale à 1%, la largeur du bassin sera égale à 8m (voir figure 5.2).

- Des diguettes de séparation de hauteur $\simeq 0.3m$ et de largeur $\simeq 1.5m$ doivent être établies pour séparer un bassin à un autre.
- La pente du terrain peut atteindre 2.5% pour les vergers (arboricultures), i.e., les arbres fruitiers.

5.2.2 Cultures recommandées

Les cultures recommandées pour ce types d'irrigation sont : le riz, les pâturages (e.g. luzerne, trèfle), le tabac, les céréales et les arbres fruités (agrumes et bananiers). Pour ces derniers, des petits bassins (cuvettes) sont aménagés autour des arbres.

L'irrigation par bassins n'est pas recommandée pour les cultures qui ne tolèrent pas la submersion pour des durées supérieures à 24 heures ou à racines tubercules, telles que la pomme de terre et les carottes.

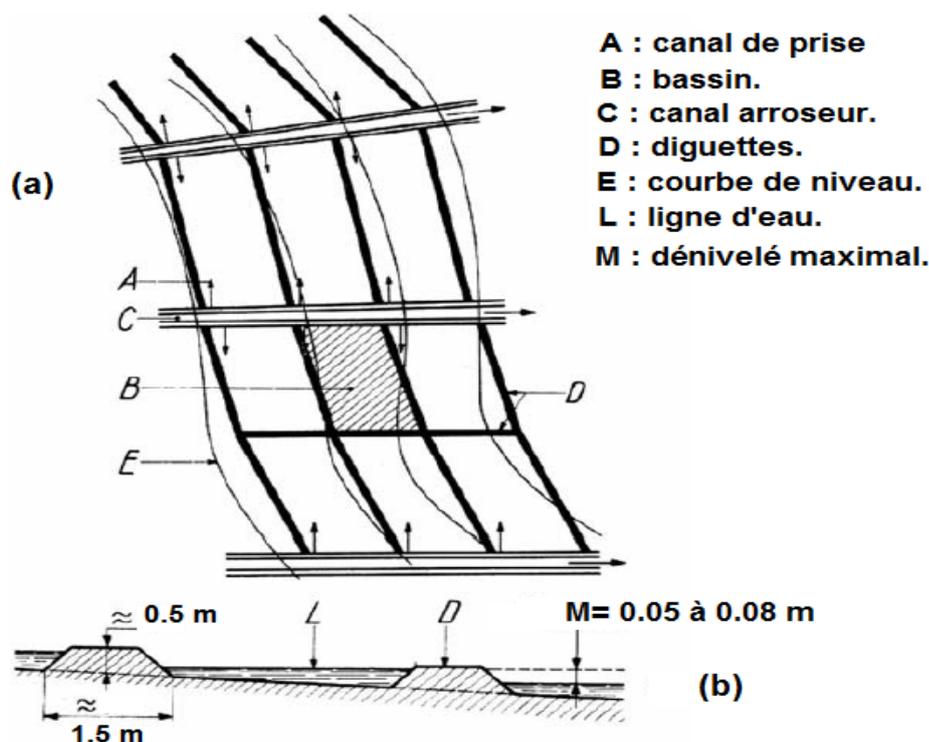


FIGURE 5.1 – Irrigation par bassins (CLÉMENT and MEYLAN (1978))

5.2.3 Méthodes de mise en eau des bassins

5.2.3.1 La méthode directe

Les eaux d'irrigation sont directement introduites dans le bassin à partir du canal d'amenée par l'intermédiaire soit de :

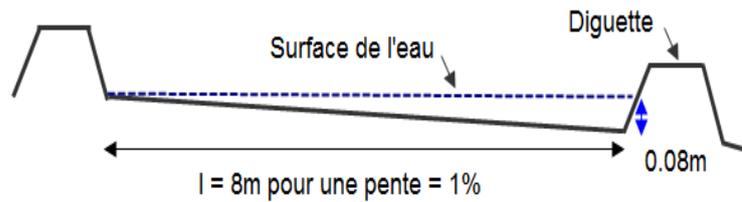


FIGURE 5.2 – Aménagement des bassins d'irrigation

- Siphons reliant le canal d'amenée avec les bassins (figure 5.3);
- Tuyaux d'alimentation traversant les diguettes (figure 5.4);
- Ouvertures temporaires aménagées dans les diguettes (figure 5.5).

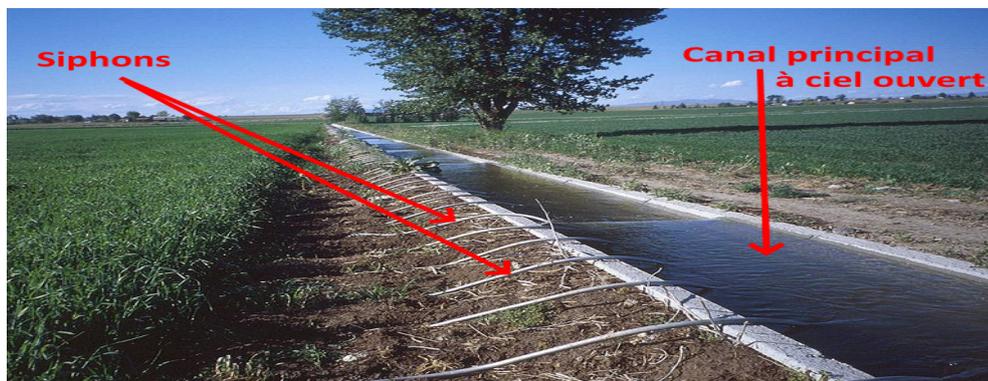


FIGURE 5.3 – Utilisation des siphons

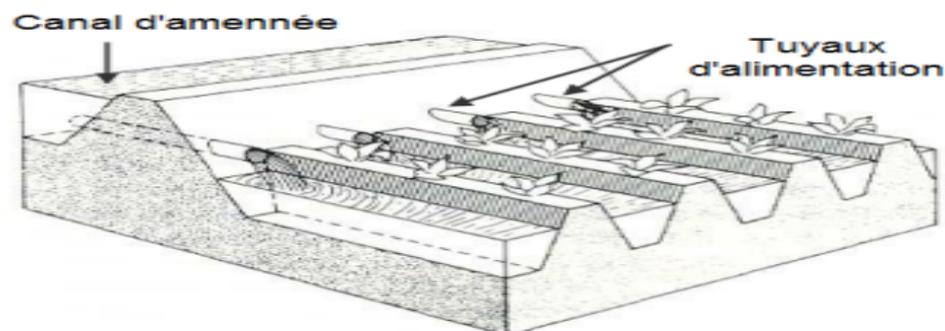


FIGURE 5.4 – Irrigation directe des bassins : utilisation des tuyaux d'alimentation

5.2.3.2 La méthode d'alimentation en cascade

Dans les terrains en pente, l'irrigation directe n'est pas convenable. La solution est **la mise en eau en série des terrasses des bassins** (chaque bassin doit être divisé en un ensemble de terrasses relativement plates. D'abord, la première terrasse est irriguée à partir du canal d'amenée, ensuite les eaux sont acheminées aux terrasses suivantes par réalisation des ouvertures temporaires dans les diguettes avales, et ainsi de suite jusqu'à atteindre la diguette le plus en aval (figure 5.6). Cette technique n'est pas optimale pour les sols sableux à cause des pertes importantes des eaux par infiltration avant d'arriver à la dernière terrasse. La solution est la

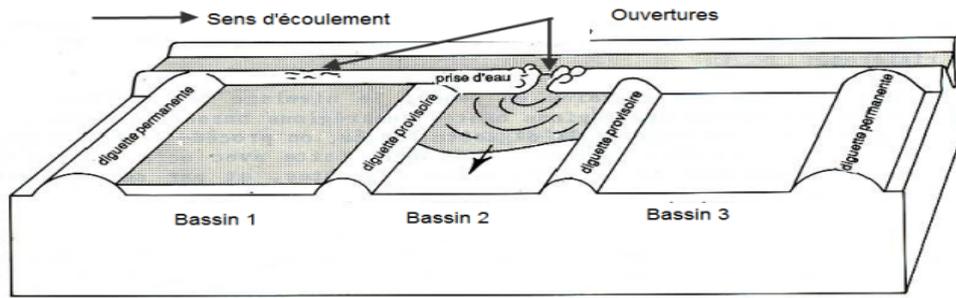


FIGURE 5.5 – Irrigation directe des bassins : Ouvertures temporaires dans les diguettes (Brouwer et al. (1990))

réalisation des rigoles (caniveaux) perpendiculaires au canal d'amenée en acheminant l'eau aux terrasses.

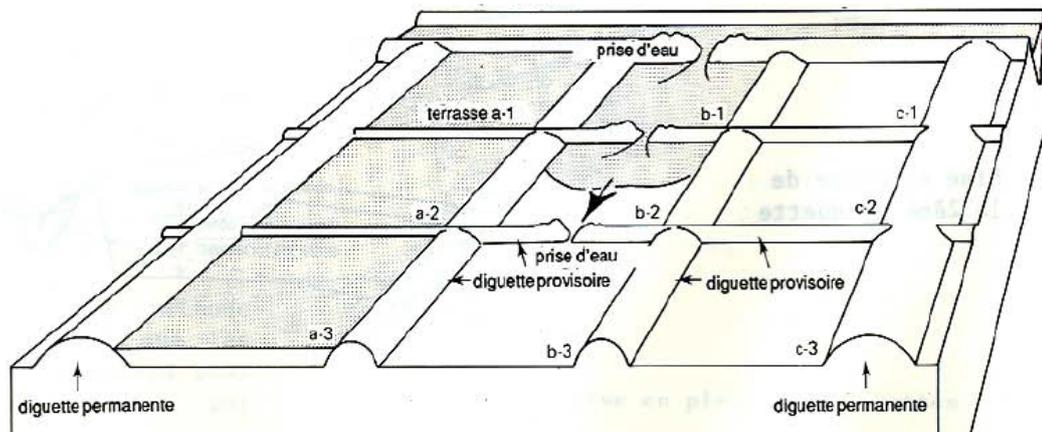


FIGURE 5.6 – Irrigation en cascade des bassins (Brouwer et al., 1990)

5.3 Irrigation par sillons (à la raie)

Les sillons sont des petites rigoles parallèles en terre, aménagés pour le transport des eaux d'irrigation. Les plantes sont généralement cultivées sur les raies ou les billons séparant deux sillons consécutifs.

5.3.1 Dimensionnement et aménagement du sol

- Cette technique d'irrigation est utilisable pour la plupart des sols. Les sols sableux sont à éviter à cause de la perte importante par percolation.
- Les terrains plats ou en pente douce sont les plus adéquats pour l'irrigation par sillons.
- La pente des sillons ne doit pas dépasser 0,5%. En terrain accidenté (pente entre 0,5% et 3%) ou à pente irrégulière, les sillons doivent être réalisés en suivant les courbes de niveau afin d'assurer une bonne uniformité d'irrigation et d'éviter l'érosion du sol.
- La longueur des sillons dépend de la pente du terrain. Si la pente est forte, la longueur

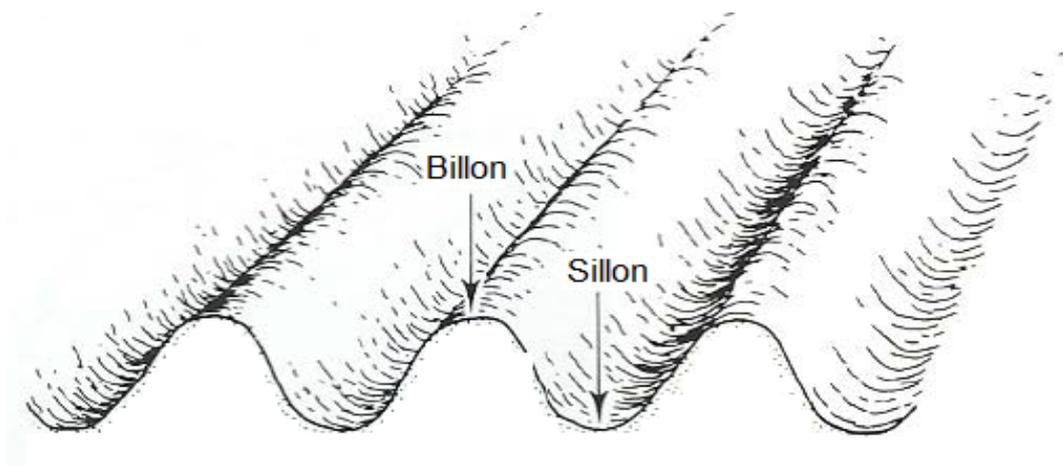


FIGURE 5.7 – Forme des sillons (Brouwer et al., 1990)

doit être courte et si la pente est faible, la longueur peut être longue.

- La longueur des sillons varie inversement avec la perméabilité du sol. Si le sol est caractérisé par une perméabilité importante (les sols sableux par exemple), la longueur des sillons doivent être courte. Pour les sols de faible perméabilité (sols limoneux ou argileux), la longueur peut être plus importante.

TABLE 5.1 – Les longueurs maximales (indicatives) des sillons en fonction de la pente du terrain (i), le débit (Q), la dose d'arrosage (B) et du type du sol

| Pente i^a (%) | Q^b (l/s) | Argile | | Limon | | Sable | |
|-----------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | $B^c=50$ mm | $B=75$ mm | $B=50$ mm | $B=75$ mm | $B=50$ mm | $B=75$ mm |
| 0.0 | 3.0 | 100m | 150m | 60m | 90m | 30m | 45m |
| 0.1 | 3.0 | 120m | 170m | 90m | 125m | 45m | 60m |
| 0.2 | 2.5 | 130m | 180m | 110m | 150m | 60m | 95m |
| 0.3 | 2.0 | 150m | 200m | 130m | 170m | 75m | 110m |
| 0.5 | 1.2 | 150m | 200m | 130m | 170m | 75m | 110m |

^a la pente du sillon (%);

^b débit unitaire par sillon (l/s);

^c la dose d'arrosage en (mm).

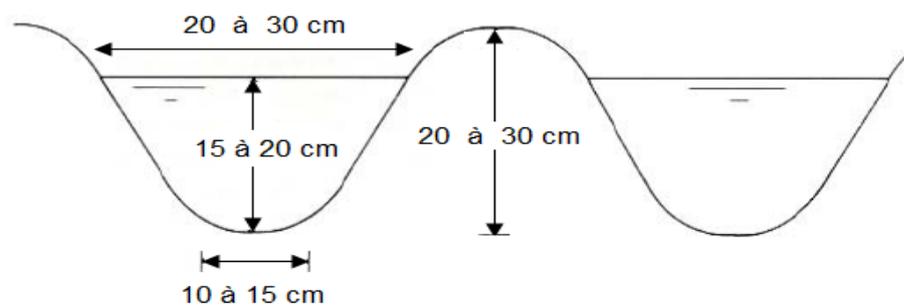


FIGURE 5.8 – Sillons profonds et de faible ouverture (sols sableux).

NB : Les techniques directes de mise en eau (par siphon, par tuyau ou par ouverture dans le canal d'amenée) peuvent être utilisées.

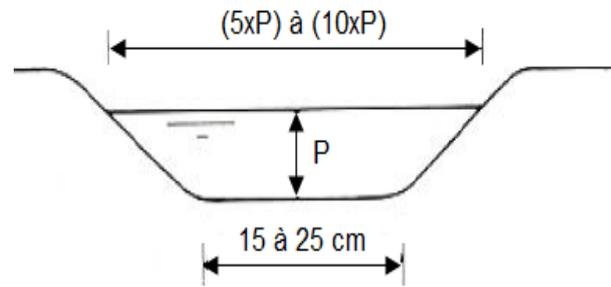


FIGURE 5.9 – Sillons larges et de faible profondeur (sols argileux)

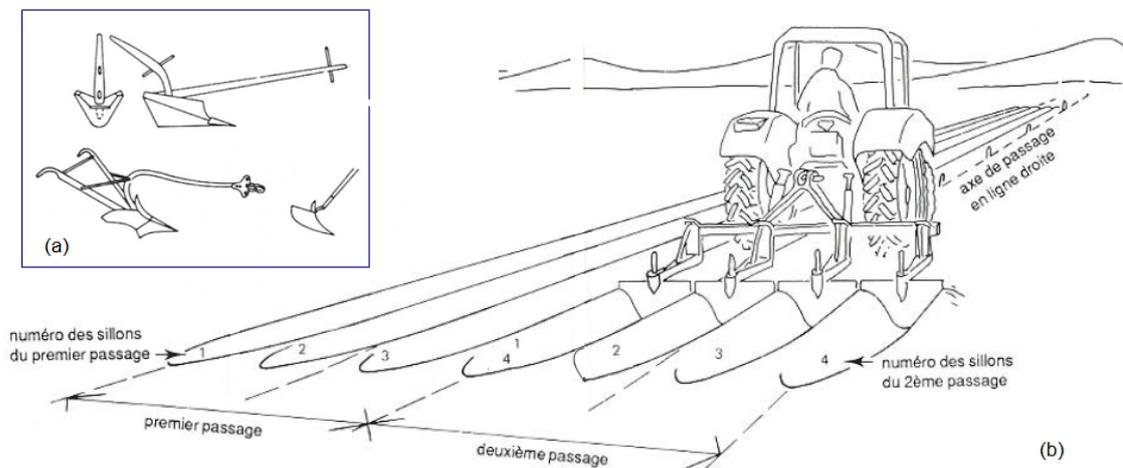


FIGURE 5.10 – Moyens de réalisation des sillons. (a) : moyens manuels et traditionnels (sillon-neurs). (b) moyens mécaniques (Brouwer et al., 1990)

5.3.2 Cultures recommandées

Plusieurs types de cultures peuvent être irriguées par cette méthode, notamment :

- Les légumes, telles que : les poivrons, les piments, les courgettes, les pommes de terre...etc.
- Les cultures en lignes, telles que : le maïs, le tournesol, la canne à sucre, le soja, ...
- Les cultures ne supportant pas la submersion de leur feuillage ou leur collet (la partie de transition entre le système racinaire et la tige d'une plante) par l'eau sur une longue durée (les tomates par exemple).
- Les arboricultures.

5.3.3 Profils d'humectation

Les profils d'humectation (humidification) sont présentés sur les figures 5.11 et 5.12

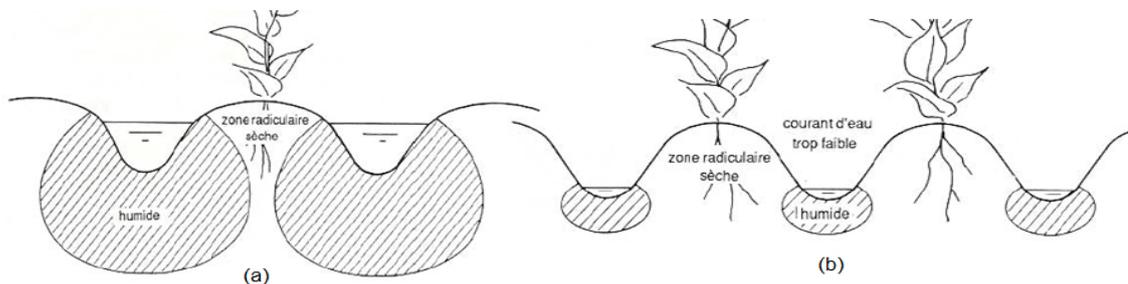


FIGURE 5.11 – (a) Espacement important entre sillon, (b) irrigation insuffisante

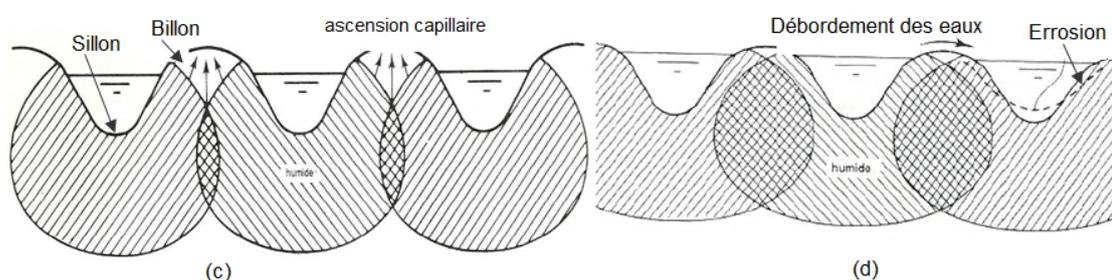


FIGURE 5.12 – (c) Irrigation idéale, (d) débordement d'eau (sur-irrigation)

5.4 Irrigation par planche

Les planches sont généralement des bandes de terre assez longues, à pente uniforme, séparées par des diguettes. Contrairement à l'irrigation par bassins, les diguettes ne sont pas conçues pour former des cuvettes pour contenir les eaux, mais pour guider les filets d'eau dans leur ruissellement à travers la planche (figure 5.13).

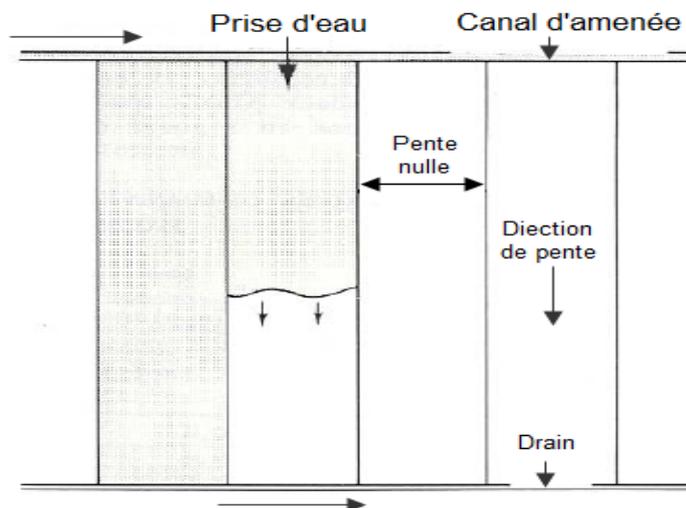


FIGURE 5.13 – Irrigation par planches

L'irrigation par planches est recommandée pour les exploitations de grande taille, où les travaux agricoles sont mécanisés. En effet, une exploitation aménagée en planches de grande longueur offre de longues périodes d'utilisation ininterrompue des machines agricoles.

Cette méthode d'irrigation n'est pas pratique dans le cas des petites exploitations où les travaux agricoles sont faits à l'aide de la main-d'œuvre, ou bien par traction animale.

5.4.1 Dimensionnement et aménagement du sol

- Les planches peuvent atteindre 800m de longueur. La largeur varie de 3 à 30m. Les dimensions définitives des planches dépendent de plusieurs facteurs.
- La pente des planches doit être uniforme, et varie entre 0,05% à 2% pour faciliter le drainage et éviter l'érosion.
- Les sols appropriés à ce mode d'irrigation sont les sols profonds limoneux et argileux, à taux d'infiltration moyen. Cette technique n'est pas recommandée pour les sols argileux lourds où l'infiltration des eaux est assez lente. Dans ce dernier cas, l'irrigation par bassins est préférable.

TABLE 5.2 – Dimensions maximales (indicatives) des planches

| Type du sol | pente de la planche (%) | Débit unitaire par mètre de largeur (U/s) ^a | Largeur de la planche (m) | Longueur de la planche (m) |
|--|-------------------------|--|---------------------------|----------------------------|
| Sable | 0.4 - 0.4 | 0 - 15 | 12 - 30 | 60 - 90 |
| Taux d'infiltration supérieur à 25mm/h | 0.4 - 0.6 | 8 - 10 | 9 - 12 | 60 - 90 |
| | 0.6 - 1.0 | 5 - 8 | 6 - 9 | 75 |
| Limon | 0.2 - 0.4 | 5 - 7 | 12 - 30 | 90 - 250 |
| Taux d'infiltration de 10 à 25 mm/h | 0.4 - 0.6 | 4 - 6 | 6 - 12 | 90 - 180 |
| | 0.6 - 1.0 | 2 - 4 | 6 | 90 |
| Argile | 0.2 - 0.4 | 3 - 4 | 12 - 30 | 180 - 300 |
| Taux d'infiltration inférieur à 10mm/h | 0.4 - 0.6 | 2 - 3 | 6 - 12 | 90 - 180 |
| | 0.6 - 1.0 | 1 - 2 | 6 | 90 |

^a Le débit est donné par mètre linéaire de largeur de la planche. Par conséquent, le débit total s'obtient en multipliant le débit unitaire par la largeur de la planche exprimée en mètres.

5.4.2 Cultures recommandées

Cette technique convient particulièrement à l'irrigation de la luzerne, des céréales et des pâturages.

5.4.3 La mise en eau des planches

La mise en eau des planches consiste à introduire un courant d'eau à partir du canal d'amenée, à l'extrémité supérieure de celles-ci (figure 5.1). L'eau ruisselle en descendant la

penne de la planche. Une fois le volume d'eau nécessaire est introduit dans la planche, le courant d'eau est arrêté par la fermeture de la prise. La fermeture de la prise d'eau doit intervenir, suivant les cas, comme suit :

1. En sol argileux, le courant d'eau est arrêté quand l'eau couvre 60% de la planche. Par exemple, si la longueur de la planche est de 100m, un jalon est placé à 60m de l'amont. Quand l'eau atteint le jalon, la prise d'eau est fermée.
2. En sol limoneux, le débit d'eau est arrêté quand l'eau couvre 70 à 80% de la planche.
3. En sol sableux, la fermeture de la prise d'eau intervient uniquement quand l'eau couvre la totalité de la planche.

5.4.4 Profils d'humectation

Si le débit d'irrigation introduit à une planche est faible, il sera perdu par percolation profonde aux voisinages du canal d'amenée (figure 5.14). Ce phénomène est remarquable notamment pour les sols sableux.

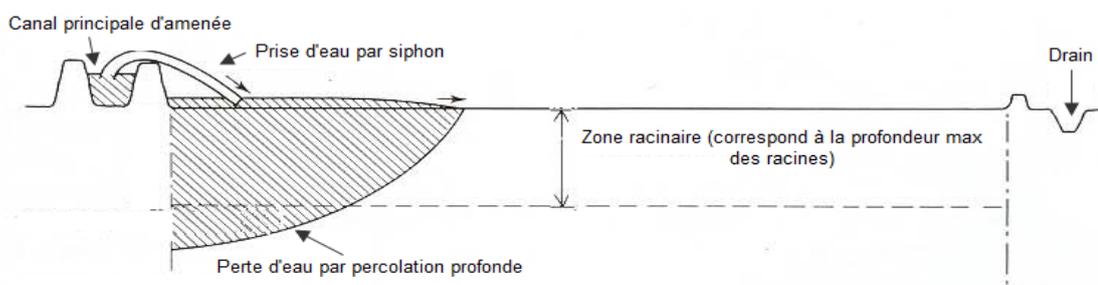


FIGURE 5.14 – Irrigation inadéquate (faible débit et percolation profonde)

Si le débit d'irrigation est fort, l'eau atteint rapidement la fin (l'extrémité aval et le drain) de la planche avant que la quantité suffisante d'eau soit introduite dans le sol pour irriguer la zone racinaire. Dans ce cas, la prise doit rester ouverte jusqu'à ce que l'humectation de la zone racinaire soit adéquate. Dans ce cas, il y aura des pertes d'eau restituées avec le canal du drainage (figure 5.15). Les débits d'irrigation trop forts peuvent provoquer l'érosion des planches. À cet effet, les débits doivent être réglés de façon à éviter la sous-irrigation, les pertes d'eau et l'érosion.

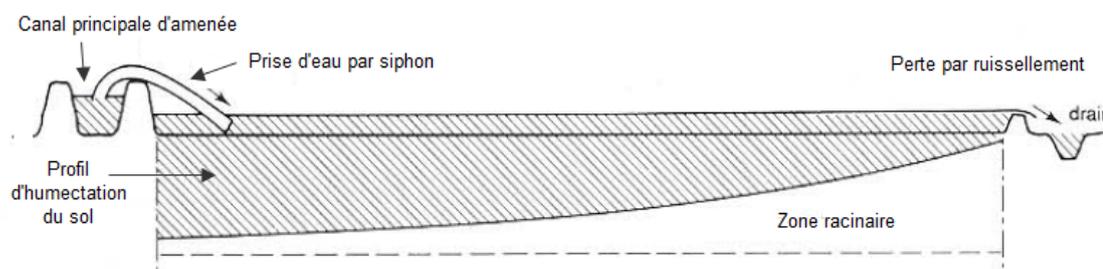


FIGURE 5.15 – Fort débit et perte d'eau par drainage

5.5 Sommaire

Ce chapitre couvre les trois techniques principales de l'irrigation par surface.

- Cette famille de techniques nécessite l'aménagement adéquat du sol, notamment les pentes.
- L'irrigation de surface ne nécessite pas assez de matériel à installer au contraire au autres méthodes.
- L'irrigation de surface est éviter lorsque la vitesse d'infiltration est importante (sols sableux par exemple) à cause des pertes d'eau importante par infiltration.
- L'irrigation de surface est éviter lorsque la vitesse d'infiltration est trop faible (sols argileux par exemple) à cause des pertes d'eau importante par ruissellement et stagnation de l'eau dans les cuvettes pour des longues durées.
- L'automatisation de ces méthodes d'irrigation n'est pas possible car elles requièrent des travaux directs du sol.
- Les méthodes d'irrigation par surface sont à retenir lorsque la capacité d'investissement et/ou les moyens mécaniques ne sont pas facilement disponibles, car ces méthodes exigent un travail mécanique lors de la préparation du sol uniquement.
- L'irrigation de surface ne nécessite pas une main-d'œuvre de haute technicité, mais le nombre d'ouvrier est proportionnel à la surface exploitée.

Chapitre 6

Irrigation par aspersion

Introduction

Le choix du mode d'irrigation dépend de certains facteurs : techniques et sociologiques, cultures pratiquées, type du sol, structure parcellaire, topographie, qualité d'eau d'irrigation et coûts d'investissement. L'irrigation par aspersion est largement répandue à plusieurs types de cultures et satisfait une large variété de critères.

6.1 Définition

L'irrigation par aspersion consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle.

- L'eau est mise sous pression (généralement par pompage) pour être distribuée au moyen d'un réseau de canalisations.
- La distribution d'eau est faite au moyen de rampes d'arrosage équipées d'asperseurs ou des buses (cas de pivot).
- L'eau sort sous forme d'un jet et se répartit en gouttelettes d'eau et tombent sur le sol.
- Le choix du dispositif de pompage, des asperseurs et la bonne gestion de l'eau doivent garantir la distribution uniforme de l'eau d'irrigation.

6.2 Les éléments d'une installation d'aspersion

Généralement, une installation d'irrigation par aspersion requiert les éléments suivants (figure 6.1) :

6.2.1 La source d'eau

Peut être une nappe phréatique, puits, forage, source, ... etc, ou barrage, retenue collinaire, lac, étang, réseau collectif, ... etc. Elle doit être équipée par une unité de pompage (dans la plus part des cas).

6.2.2 La conduite de distribution principale

Appelée "d'amenée", "principale", "primaire" : généralement enterrée ou posée sur la surface du sol. Elle peut être fabriquée en acier, en amiante ciment, ou en matière plastique (PVC, PEHD).

6.2.3 La conduite d'approche (porte-rampes)

"Secondaire" ou "antenne" : elle est branchée sur la conduite principale et placée sur la surface du sol, souvent selon un axe de symétrie de l'installation. Elle peut être transportable d'un terrain à l'autre. Elle est constituée de tube en alliage léger à raccord rapide de longueur normalisée (6m ou 9m). On trouve sur cette conduite des Tés (avec ou sans vannes) à un écartement normalisé (6m, 12m, 18m,...) ou (9m, 18m, 27m,...). Le tableau 6.1 résume ses caractéristiques principales.

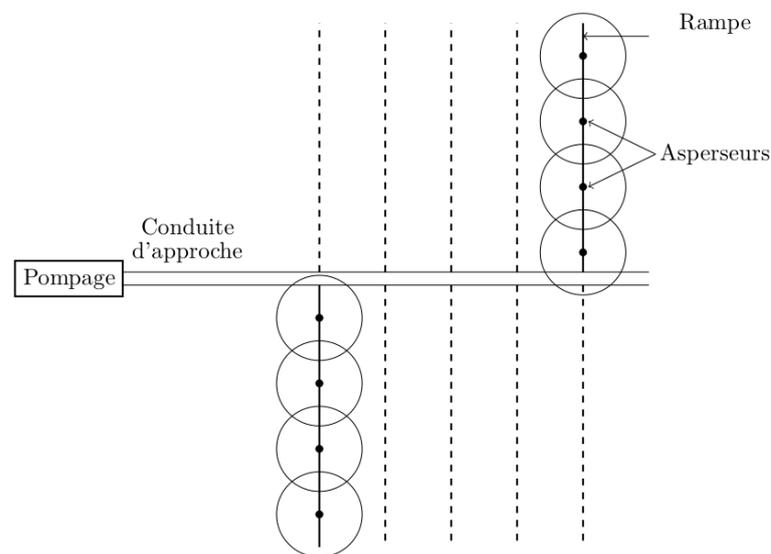


FIGURE 6.1 – Schéma général de l'irrigation par aspersion

6.2.4 Les rampes

Branchées sur la porte rampe, généralement constituées de tubes de longueurs normalisées (6m u 9m) à écartement de (6m, 12m, 18m,...). La rampe porte les asperseurs rotatifs. La liaison rampe-asperseur est assurée par un raccord.

TABLE 6.1 – Caractéristiques des portes-rampes les plus fréquentes (Cemagref/IRSTEA,2006)

| Matière de tube | Diamètre (mm) | Longueur des éléments (m) | PN (bars) |
|--|-------------------|---------------------------|-----------|
| Acier galvanisé ou Aluminium (alliage) | 80; 100; 125; 150 | 3; 6; 9 | 14 - 16 |
| PVC | 70; 100 | 3; 6; 9 | 6 |

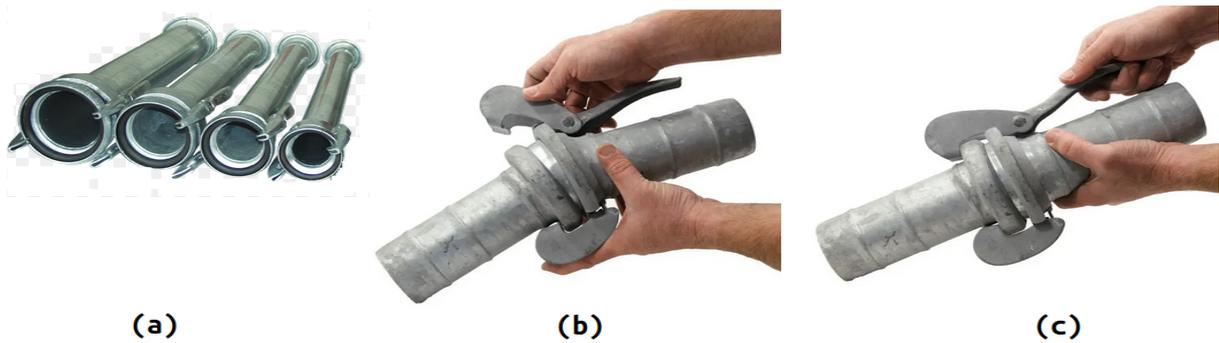


FIGURE 6.2 – (a) Tuyaux en acier galvanisé (ou aluminium) à raccord rapide, (b) montage du raccord, (c) fermeture du raccord (adapté depuis <https://portablepiping.com/home/products/galvanized-steel-pipe/>)

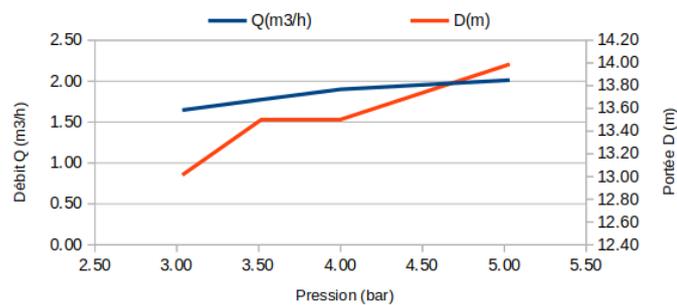


FIGURE 6.3 – Variation du débit et la portée d'un asperseur en fonction de la pression appliquée (buse $4.4 \times 2.4\text{mm}$)

6.2.5 Les asperseurs

Sont des arroseurs rotatifs permettant la distribution uniforme de l'eau analogue à la pluie naturelle.

Un asperseur est caractérisé par le diamètre de sa buse qui définit le débit de l'asperseur, la portée de jet et la répartition de l'eau (pluviométrie) le long de jet pour une pression déterminée.

Il existe des asperseurs équipés d'une seule buse (mono-buse) ou de deux (02) buses (double buse) de diamètre différent (Table 6.2 et figure 6.4).

TABLE 6.2 – Caractéristiques des asperseurs (Cemagref/IRSTEA,2006)

| Type d'asperseur | Dimensions de la buse (mm) | Débit (m ³ /h) | Pression (bars) |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------|
| Mono-buse | 4 ^a x 4.8 ^b | 1.2 - 1.7 | 3.5 |
| Double-buse | 2.4 x 4; 2.4 x 4.4; 2.4 x 4.8 | 1.5; 1.7; 2.1 | 3.5 |

^a diamètre de la buse (mm);

^b hauteur de la buse (mm).

6.2.5.1 Remarque

La performance de l'irrigation par aspersion est maximum si la pression de service spécifiée par les fabricants est respectée.

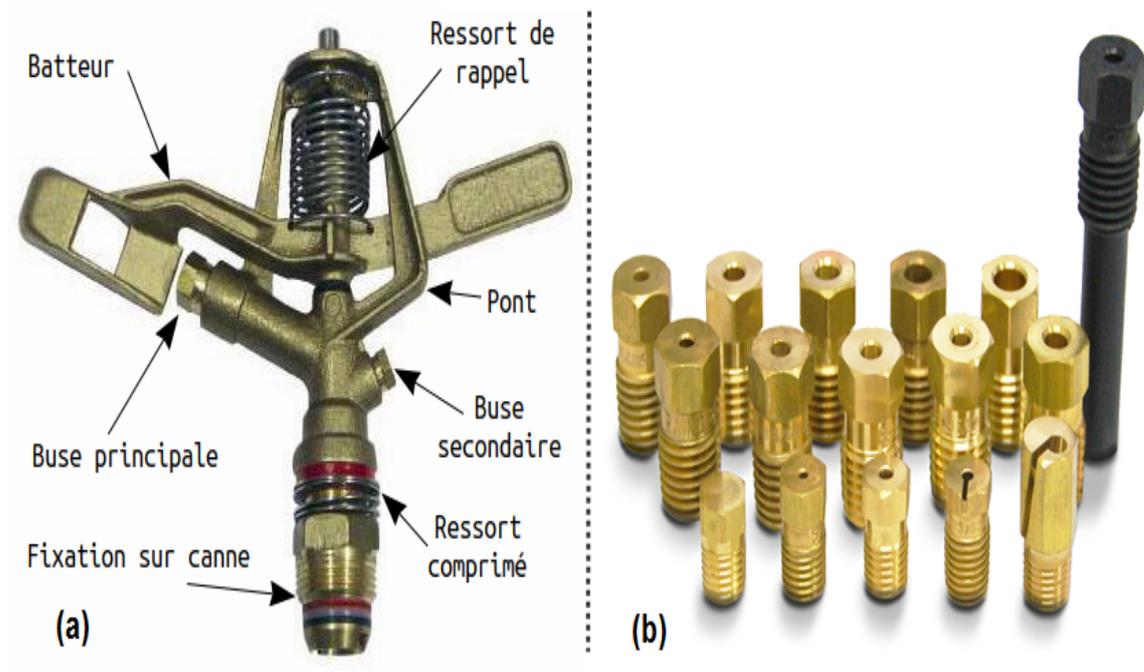


FIGURE 6.4 – (a) Asperseur, (b) Buses (Modèles Sprinkler)

Remarque : Pour ce modèle d'asperseur (Figure 6.4), les caractéristiques sont :

- Portée du jet = 9 à 14 m ;
- Débit = 240 à 1,440 l/h ;
- Pression de fonctionnement = 1 à 4 bar ;
- Angle du jet = 28° ;
- Hauteur max du jet = 2.2m ;
- Nombre de buse = 1 (mono-buse).

6.3 Cultures recommandées

Les cultures :

1. Les cultures en lignes, telles que : la pomme de terre, ... ;
2. Les cultures de plein champ notamment les céréales : Le blé, l'orge, le maïs,... ;
3. L'arboriculture : La pomme, ...

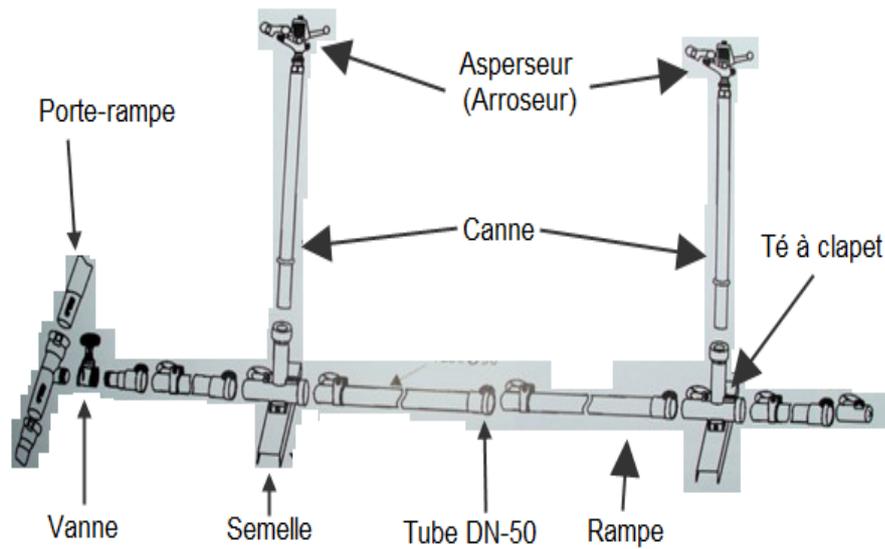


FIGURE 6.5 – Installation d'irrigation par aspersion

6.4 Schémas d'installation

La figure 6.6 montre les différents schémas d'installation d'irrigation par aspersion.

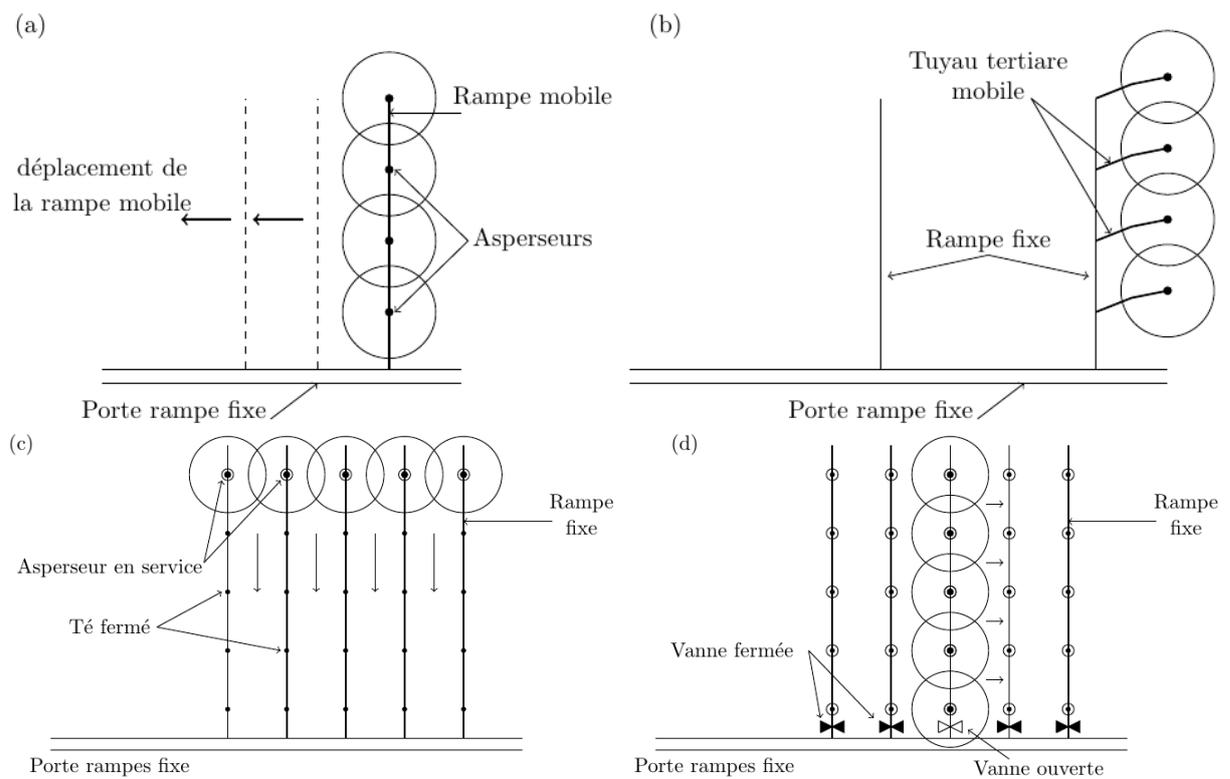


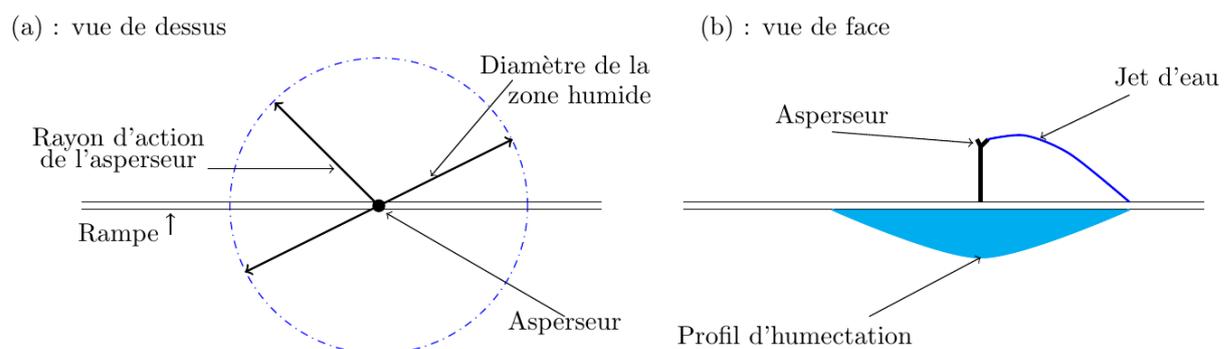
FIGURE 6.6 – (a) installation mobile classique, (b) installation avec tuyaux mobiles tertiaires, (c) installation avec quadrillage total, (d) installation en couverture intégrale (totale)

Remarques :

- **L'installation mobile classique** requiert le minimum d'investissement de ce système d'irrigation. Les rampes + asperseurs sont à déplacer pour chaque poste d'irrigation. Cette installation nécessite un travail manuel conséquent par rapport aux autres.
- **Les tuyaux mobiles** permettent de couvrir une surface du sol plus importante sans déplacer les rampes.
- **Pour une couverture totale**, le déplacement des asperseurs est nécessaire après chaque **poste d'irrigation**.
- Souvent, il faut attendre jusqu'à la ressuage du sol avant de déplacer les asperseurs (Rieul et al., 2003).
- L'augmentation du nombre de postes réduit le temps d'arrosage de la parcelle et le travail manuel nécessaire de déplacement des asperseurs.
- La durée d'irrigation par poste d'aspersion varie entre 6 à 10 heures généralement.
- **Pour une couverture intégrale**, l'automatisation de l'irrigation est possible (Rieul et al., 2003).

6.5 Profils d'humectation

Une distribution d'eau plus ou moins uniforme est obtenue par une série d'asperseurs en fonctionnement simultané. Pour obtenir une bonne uniformité de distribution d'eau, le chevauchement (croisement) doit être au moins 65% du rayon d'action des asperseurs. Ce chevauchement permet aussi d'éviter les effets de déformation du jet d'eau résultante des vitesses de vent importantes.

**FIGURE 6.7** – Profil d'humectation d'un asperseur isolé

Deux (02) dispositions d'asperseurs sont utilisées (en carrée et en triangle, figure 6.9).

1. La disposition en carré est la plus courante, avec une distance maximale de $d = R\sqrt{2}$ entre deux arroseurs voisins (R étant la portée du jet).
2. La disposition en triangle est parfois adoptée, avec une distance maximale de entre arroseurs voisins $d = R\sqrt{3}$.

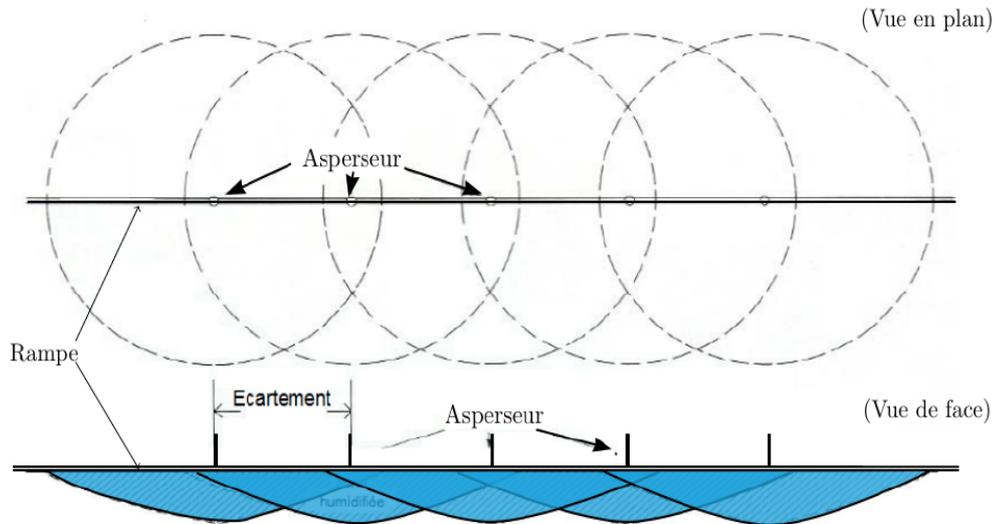


FIGURE 6.8 – Profil d'humectation des asperseurs en fonctionnement simultané (Brouwer et al. (1990))

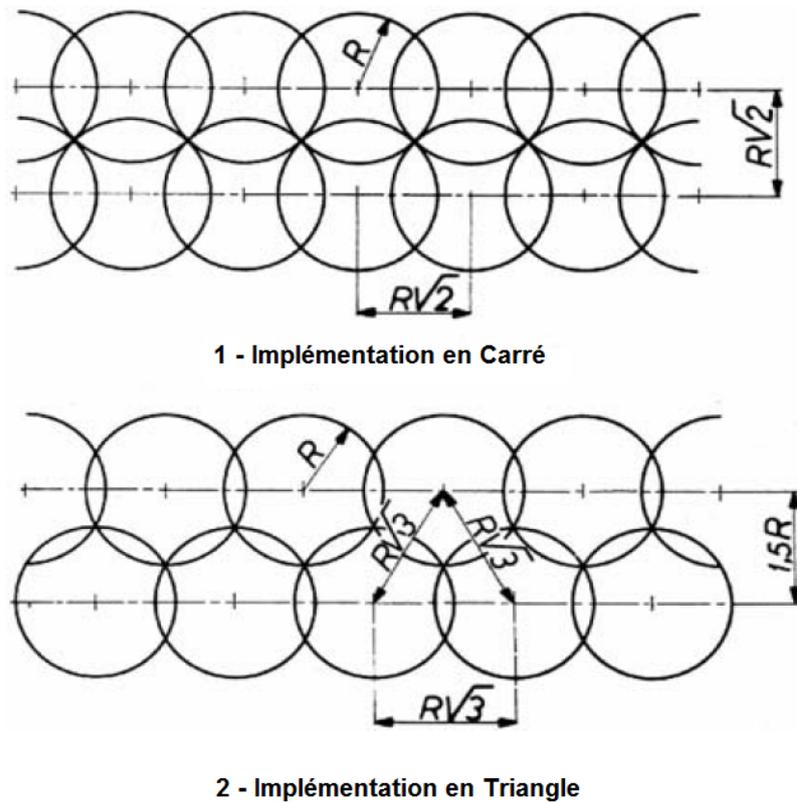


FIGURE 6.9 – Installation d'irrigation par aspersion (CLÉMENT and MEYLAN (1978))

Remarque : L'espacement entre asperseurs et l'écartement entre rampes doivent être réduits si la vitesse de vent est importante.

6.6 Dimensionnement simplifié

Le dimensionnement d'un réseau d'irrigation par aspersion nécessite le choix convenable des asperseurs.

Données :

- $B_{net}(mm/mois)$, $B_{net,j}(mm/j)$: besoin net mensuel et journalier, respectivement ;
- $k(mm/h)$: la vitesse d'infiltration du sol ;
- $p(mm/h)$: la pluviométrie de l'asperseur (ou intensité pluviométrique maximale de l'asperseur) ;
- J_i : nombre de jours effectifs d'irrigation durant la période considérée. Ce paramètre peut être ajusté en fonction des résultats du calcul et/ou les exigences (contraintes) du projet.
- $t_j(h)$: nombre d'heures effectif d'irrigation ;
- $S(ha)$: la surface à irriguer ;
- E : rendement (efficience) du système d'irrigation (de 80% à 85% pour l'irrigation par aspersion).

§1 Débit d'équipements :

$$Q(m^3/h) = \frac{B_{net}(mm/mois) \times S(ha) \times 10}{J_i(j) \times t_j(h) \times E} \quad (6.1)$$

Si le débit disponible est inférieur au débit calculé par l'équation précédente (Eq. 6.1), il faut soit augmenter le nombre de jours d'irrigation (J_i) ou le nombre d'heures d'arrosage (t_j), soit diminuer la surface à irriguer (S).

§2 Dose pratique d'arrosage : Voir la section 4.6.1.

$$D_p(m^3/ha) = RFU(mm) \times 10 \quad (6.2)$$

§3 Fréquence d'arrosage : Voir la section 4.6.2.

$$n = \frac{B_{net}(mm/mois) \times 10}{D_p} \quad (\text{opérations/mois}) \quad (6.3)$$

§4 Dose réelle d'arrosage : Voir la section 4.6.3.

$$D_r = \frac{B_{net}(mm/mois) \times 10}{n} \quad (m^3/ha) \quad (6.4)$$

§5 **Nombre de postes d'arrosage (n_p)** : Ce nombre doit être fixé en fonction du schéma d'installation (Section 6.4).

§6 **Durée d'arrosage par poste (t_p (heures))** : Il se calcule par l'équation suivante :

$$t_p = \frac{t_j}{n_p} \quad (6.5)$$

§7 **Intensité pluviométrique moyenne I (mm/h)** :

$$I = \frac{D_r(\text{mm}/j)}{t_p} \quad (6.6)$$

§8 **Surface à irriguer à chaque poste s (ha)** :

$$s(\text{ha}) = \frac{S(\text{ha})}{n_p \times J_i} \quad (6.7)$$

§9 **Nombre d'asperseurs**

1. **Pour une couverture totale** : dans ce cas, le nombre est celui nécessaire pour couvrir la surface à chaque poste :

$$n_a = \frac{s \times 10'000}{e \times d} \quad (6.8)$$

Tels que :

- n_a : nombre d'asperseurs ;
- s : surface du poste irrigué (ha) ;
- e : espacement entre lignes (rampes) (m) ;
- d : distance entre asperseurs en (m).

2. **Pour une couverture intégrale** : dans ce cas, le nombre doit couvrir l'intégralité de la surface S :

$$N_a = \frac{S \times 10'000}{e \times d} \quad (6.9)$$

§10 **Diamètre de la buse** : Le diamètre de la buse d'un asperseur doit être déterminée en fonction de la perméabilité du sol. En effet, la pluviométrie de l'asperseur ne doit pas dépasser la perméabilité du sol pour éviter la perte d'eau par ruissellement (Eq. 6.10).

$$p \leq k \quad (6.10)$$

Tels que :

- p : la pluviométrie de l'asperseur (mm/h) ;
- k : la perméabilité du sol (mm/h).

Le diamètre approximatif de la buse se calcule par la formule suivante (Eq. 6.11). Ce diamètre doit être normalisé en fonction du matériel disponible sur le marché.

$$d = \frac{1.04 \times p}{1.5} \quad \text{avec : } p = k \quad (6.11)$$

§11 Portée de l'asperseur : La portée approximative de l'asperseur peut être calculée par la formule ci-après (Eq. 6.12). La portée doit être confirmée avec le catalogue du matériel choisi. La valeur référée dans ce dernier est à utiliser pour la conception du réseau d'irrigation.

$$R = 3 \times d^{0.5} \times h^{0.25} \quad (6.12)$$

Tels que :

- R : portée de l'asperseur (m), c'est le rayon d'action ;
- d : diamètre normalisé de la buse (mm) ;
- h : pression à la buse (m).

§12 Écartements entre rampes : Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer l'écartement entre deux rampes voisines.

- **En fonction du schéma d'implémentation des asperseurs :**

1. Pour un schéma de d'implémentation en carré (Fig. 6.9) :

$$Ecart.Rampes = d = R \times \sqrt{2} \quad (6.13)$$

2. Pour un schéma d'implémentation en triangle (Fig. 6.9) :

$$Ecart.Rampes = d = 1.5 \times R \quad (6.14)$$

Telle que R est la portée de l'asperseur (m) ;

- **En fonction de portée de l'asperseur :** Les normes américaines prévoient un écartement selon l'équation 6.15 :

$$Ecart.Rampes = d = (1.2 \text{ à } 1.3) \times R \quad (6.15)$$

§13 Écartement entre arroseurs : L'écartement entre deux arroseurs voisins doit permettre un certain chevauchement pour avoir un profil d'humectation uniforme et pour réduire l'effet du vent sur le jet de l'asperseur.

- **En fonction du schéma d'implémentation des asperseurs :**

1. Pour un schéma d'implémentation en carré (Fig. 6.9) :

$$Ecart.Asperseurs = e = R \times \sqrt{2} \quad (6.16)$$

2. Pour un schéma d'implémentation en triangle (Fig. 6.9) :

$$Ecart.Asperseurs = e = R \times \sqrt{3} \quad (6.17)$$

Telle que R est la portée de l'asperseur (m) ;

— **En fonction de portée de l'asperseur** : L'équation 6.18 peut être utilisée :

$$Ecart.Rampes = (0.5 \text{ à } 0.8) \times R \quad (6.18)$$

6.7 Avantages de l'irrigation par aspersion

1. Adaptation à n'importe quel type de terrain (accidenté, pente nulle, ... etc) ;
2. Employée quelque soit la nature du sol (la vitesse d'infiltration doit être supérieure à 3mm/h) ;
3. Permet une oxygénation de l'eau ;
4. Permet une protection antigél dans les zones arides ;
5. Économie de l'eau jusqu'à 50% par rapport à l'irrigation par surface ;
6. Rendement (efficience) de 80% à 85% ;
7. Exploitation facile du réseau.

6.8 Inconvénients de l'irrigation par aspersion

1. Investissements initiaux élevés et main-d'œuvre importante pour les grandes surfaces ;
2. Favorise l'apparition des problèmes phytosanitaires en créant un milieu propice aux champignons, insectes et autres maladies ;
3. Exige une qualité microbiologique de l'eau (pour éviter les maladies des plantes) ;
4. Développement des mauvaises herbes ;
5. Ne s'adapte pas bien avec les sols dont la vitesse d'infiltration est inférieure à 3mm/h ;
6. L'eau doit être propre. L'eau chargée par matière solides ou MES provoque l'abrasion rapide des buses ;
7. Le colmatage des buses de petits diamètres ;
8. Colmatage des sols par le phénomène de splash.
9. Sensibilité au vent, notamment lorsque sa vitesse dépasse 10km/h . L'irrigation devient impossible si cette vitesse atteint ou dépasse 30km/h (Rieul et al., 2003).

6.9 Autres techniques d'irrigation par aspersion

6.9.1 Le pivot

Le pivot (Figure 6.10) est un dispositif géant d'aspersion portant un nombre important d'arroseurs montés à l'extrémité des petites rampes (cannes) dont ces dernières sont raccordées elles mêmes avec la conduite principale du pivot. La conduite principale est couramment fabriquée en Acier galvanisé ou en Aluminium (Verma et al., 2014).



FIGURE 6.10 – Irrigation par Pivot

Le pivot fait un mouvement rotatif (circulaire). Il est actionné par un moteur, qui fonctionne généralement à l'électricité ou au diesel. Le pivot se contrôle par un système informatique qui régule le débit d'eau et la vitesse du pivot. Le pivot est très convenable pour les terrains plats de grandes superficies cultivés par des céréales (blé, orge,...etc) ou des fourrages.

Si le pivot dessert l'eau par un débit équitable le long de sa conduite principale, la portion de terrain proche de l'axe de rotation reçoit un volume d'eau plus important que la portion loin de l'axe, car le déplacement latéral du pivot diminue à chaque fois qu'on rapproche à son centre de rotation. Pour éviter ce problème, les débits des arroseurs doivent être réglés en augmentant le débit progressivement de l'axe de rotation à l'extrémité du pivot (Figure 6.11).

Le pivot est utilisé au sud algérien (figure 6.12) pour irriguer des champs de céréales telles que le blé tendre, le blé dur, le maïs, etc. Les surfaces irriguées par pivot sont de l'ordre de 50 à 60ha.

6.9.2 Asperseurs avec rallonge à tuyau souple

Une autre variante d'irrigation par aspersion a été conçue pour économiser la main-d'oeuvre. La plus simple est celle des asperseurs avec une rallonge à tuyau souple (figure 6.13). L'asperseur se déplace et l'irrigation s'effectue simultanément.



FIGURE 6.11 – Régulation de débits des arroseurs d'un pivot en fonction de l'éloignement par rapport à l'axe de rotation



FIGURE 6.12 – Utilisation du pivot en irrigation de blé - sud algérien, W. Timimoun



FIGURE 6.13 – Irrigation par rallonge à tuyau souple

6.10 Application - Calcul d'une installation d'aspersion

Dimensionner une installation d'irrigation par aspersion pour une couverture totale et une autre intégrale, sachant que :

- Le besoin net mensuel $B_{net} = 170\text{mm}/\text{mois}$;
- La réserve facilement utilisable $RFU = 80\text{mm}$;
- La vitesse d'infiltration $k = 15\text{mm}/\text{h}$;
- La surface de la parcelle $S = 20\text{ha}$;
- Le nombre de jours effectifs d'irrigation $J_i = 20\text{jours}/\text{mois}$;
- Le nombre d'heures d'irrigation par jour $t_j = 18\text{heures}/\text{jour}$;
- L'efficacité du système d'irrigation $E = 80\%$;
- Le débit maximal alloué à la parcelle $Q_{max} = 100\text{m}^3/\text{h}$.
- La portée de des asperseurs utilisés est $R = 12\text{m}$;
- L'intensité de pluviométrie de l'asperseur est $I_a = 10\text{mm}/\text{h}$;
- Installation carrée.

Solution :

6.10.1 Couverture totale

§1 Débit d'équipements :

$$Q(\text{m}^3/\text{h}) = \frac{B_{net}(\text{mm}/\text{mois}) \times S(\text{ha}) \times 10}{J_i(j) \times t_j(\text{h}) \times E} = \frac{170 \times 20 \times 10}{22 \times 18 \times 0.80} = 107.32\text{m}^3/\text{h} \quad (6.19)$$

Le débit d'équipement dépasse le débit maximal alloué. Dans ce cas, il faut augmenter le nombre de jours effectifs d'irrigation J_i et/ou le nombre d'heures d'irrigation par jour t_j ou diminuer la surface irriguée S .

Pour un nombre d'heures d'irrigation par jour $t_j = 20\text{heures}$, le débit d'équipements sera :

$$Q(\text{m}^3/\text{h}) = \frac{170 \times 20 \times 10}{22 \times 20 \times 0.80} = 96.59\text{m}^3/\text{h}$$

§2 La dose journalière $D_j(\text{m}^3/\text{j})$:

$$D_j = \frac{B_{net}}{30} = \frac{170}{30} = 5.67\text{mm}/\text{j} \quad (6.20)$$

§3 Période de retour (Tour d'eau) T :

$$T \leq \frac{RFU}{D_j} = \frac{80}{5.67} = 14.11 \implies T = 14\text{jour} \quad (6.21)$$

§4 Nombre mensuel de rotations d'irrigation N :

$$N \leq \frac{30}{T} = \frac{30}{14} = 2.14 \implies N = 2 \quad (6.22)$$

Le nombre mensuel de rotations d'irrigation $N = 2$, donc on recalcule la période de retour d'irrigation T :

$$T = \frac{30}{N} = \frac{30}{2} = 15 \text{ jours} \quad (6.23)$$

et la dose d'irrigation D :

$$D = D_j \times T = 5.67 \times 15 = 79.33 \text{ mm} \quad (6.24)$$

§5 Le nombre de jours d'irrigation par période j_i :

$$j_i = \frac{J_i}{N} = \frac{22}{2} = 11 \text{ j} \quad (6.25)$$

Le nombre de jour d'irrigation par période est un chiffre rond dans ce cas. **Il faut l'arrondir dans le cas contraire et recalculer le nombre de jours effectif d'irrigation J_j et le débit d'équipements Q en fonction des nouvelle valeurs.**

§6 L'intensité pluviométrique nécessaire I : Le nombre d'heures d'irrigation $t_j = 20h$. Supposons que nous prévoyons un rythme de $n_p = 04$ postes d'irrigation de durée de $t_p = 5$ heures par jour. Dans ce cas L'intensité pluviométrique nécessaire I sera :

$$I = \frac{RFU}{t_p} = \frac{80}{5} = 16 \text{ mm} \quad I = 16 \text{ mm} > k = 15 \text{ mm} \quad (6.26)$$

L'intensité pluviométrique nécessaire I dépasse la vitesse d'infiltration du sol k . Il faut augmenter le temps d'irrigation par poste t_p et diminuer le nombre de postes d'irrigation n_p . Donc, on prend $n_p = 3$ et $t_p = 6.5h$.

$$I = \frac{80}{6.5} = 12.31 \text{ mm/h} \quad I = 12.31 \text{ mm} \leq k = 15 \text{ mm} \quad (6.27)$$

Donc, on cherche des asperseurs qui débitent d'environ 12.3 mm/h . Sinon, on recalcule le temps t_p en fonction de l'intensité du modèle d'asperseurs choisi. Dans ce cas, les asperseurs utilisés débitent $I_a = 10 \text{ mm/h}$.

$$t_p = \frac{RFU}{I_a} = \frac{80}{10} = 8 \text{ h} \quad (6.28)$$

§7 La surface résultante pour chaque poste s :

$$s = \frac{S}{n_p \times j_i} = \frac{20}{3 \times 11} = 0.61ha \quad (6.29)$$

§8 Nombre d'asperseurs n_a :

$$n_a = \frac{s \times 10'000}{e \times d} \quad (6.30)$$

Pour une installation carrée, l'espacement entre asperseurs sera :

$$e = R\sqrt{2} = 12\sqrt{2} = 16.97 \Rightarrow e = 18m \quad (6.31)$$

On peut opter pour une distance entre rampes égale à l'espacement entre asperseurs, donc $d = e = 18m$. Par ailleurs, le nombre d'asperseurs sera :

$$n_a = \frac{0.61 \times 10'000}{18 \times 18} = 18.83 \Rightarrow n_a = 19$$

6.10.2 Couverture intégrale

Si le débit alloué à l'irrigation est $Q = 100m^3/h$, la surface $S = 20ha$ sera irriguée dans un temps T_{ir} :

$$T_{ir}(h) \geq \frac{B_{net}(mm/mois) \times S(ha) \times 10}{Q(m^3/h) \times E} = \frac{170 \times 20 \times 10}{100 \times 0.80} = 425heures/mois \quad (6.32)$$

§1 Nombre de jours d'irrigation par période j_i : On peut prévoir une couverture intégrale automatisée qui fonctionne par exemple 27 jours/mois pour 20 heures par jour et pour un nombre de rotations égale à $N = 3$:

$$j_i = \frac{J_i}{N} = \frac{27}{3} = 9jours \quad (6.33)$$

§2 Durée de postes d'irrigation t_p :

$$t_p = \frac{20}{n_p} = \frac{20h}{2} = 10heures \quad (6.34)$$

§3 Intensité pluviométrique I :

$$I = \frac{RFU}{t_p} = \frac{80}{10} = 8mm/h \quad (6.35)$$

§4 La surface résultante pour chaque poste s :

$$s = \frac{S}{n_p \times j_i} = \frac{20}{2 \times 9} = 1.11ha \quad (6.36)$$

§5 Nombre d'asperseurs n_a :

$$N_a = \frac{S \times 10'000}{e \times d} \quad (6.37)$$

Pour une installation carrée, l'espacement entre asperseurs sera :

$$e = R\sqrt{2} = 12\sqrt{2} = 16.97 \Rightarrow e = 18m \quad (6.38)$$

On opte pour une distance entre rampes $d = e = 18m$. Le nombre d'asperseurs pour la parcelle sera :

$$N_a = \frac{20 \times 10'000}{18 \times 18} = 617.28 \Rightarrow N_a = 618$$

6.11 Sommaire

À travers ce chapitre, on peut conclure les points suivants :

- L'irrigation par aspersion consiste à apporter l'eau aux cultures d'une manière analogue à la pluie naturelle ;
- Cette technique est recommandée pour une large variété de plantes, notamment les céréales et maraichères.
- L'installation en aspersion est une installation en charge (sous pression), donc elle nécessite une source de pression.
- L'irrigation par aspersion peut être pratiquée par plusieurs manières (asperseurs rotatifs, pivots, rallonges à tuyau souple, ... etc).
- Cette technique est très recommandée pour les cultures industrielles et l'agriculture à grande échelle.
- L'irrigation par asperseurs rotatifs peut être établie suivant différents schéma et requiert le chevauchement entre asperseurs pour avoir un profil d'humectation uniforme.
- L'automatisation des installations par aspersion est possible notamment celles d'asperseurs et de pivot.

Chapitre 7

Irrigation localisée

Introduction

L'irrigation localisée est considérée comme la nouvelle technique d'irrigation pratiquée à travers le monde. Dès l'antiquité, l'homme a constaté l'efficacité de l'usage des jarres poreuses (fabriquées en terre cuite et libèrent l'eau lentement) en irrigation (Tiercelin, 2006). Elle a été utilisée au départ en Angleterre (années 1940) sous serres, puis en plein champ dans les Territoires palestiniens occupés (années 1950) (Vermeiren and Jobling, 1983a). Au contraire des anciennes techniques, l'irrigation localisée a prouvé une efficacité prometteuse dans les zones arides (ou désertiques) caractérisées par des sols sableux et eaux salées.

Les expressions : "*irrigation localisée*", "*micro-irrigation*" et "*irrigation goutte à goutte*" expriment la même famille de techniques (Vermeiren and Jobling, 1983a ; Tiercelin, 2006).

7.1 Définition

On appelle irrigation localisée les systèmes qui consistent à :

- irriguer la parcelle par un réseau de conduites fixes sous faible pression **et** ;
- localiser l'apport d'eau au voisinage des plantes cultivées : seule une certaine fraction de volume du sol et exploitable par les racines, est humidifiée.

Cette famille de techniques peut être subdivisée en deux catégories (Vermeiren and Jobling, 1983a) :

1. Les techniques qui apportent l'eau sous la surface du sol au moyen des tuyaux de faible débit (subirrigation) ;
2. Les techniques qui apportent l'eau à la surface du sol en utilisant des tuyaux sous faible pression.

Plusieurs techniques d'irrigation localisées sont développées, telles que (CLÉMENT and MEYLAN, 1978) :

1. l'irrigation localisée par goutteurs ;
2. l'irrigation localisée par rampes perforées fixes ;

3. l'irrigation localisée par aspersion (micro-jet, micro-aspersion).

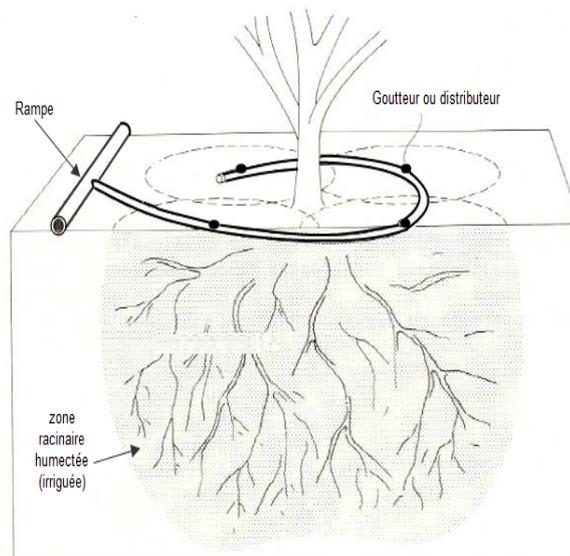


FIGURE 7.1 – Irrigation au goutte à goutte (seule la zone racinaire est humidifiée) (Brouwer et al. (1990))

7.2 Caractéristiques principales

- Les débits apportés à chaque zone humidifiée sont faibles. Ils varient entre quelques litres à quelques dizaines de litres par heure, selon les systèmes (généralement entre 2 à 20 l/h). **Théoriquement, l'irrigation localisée ne doit pas provoquer la perte d'eau par percolation profonde ou par ruissellement** (Vermeiren and Jobling, 1983a).
- En irrigation localisée, la fréquence des arrosages est supérieure à celle des autres méthodes (d'habitude tous les 1 à 3 jours), ce qui maintient une forte humidité du sol, favorable à la croissance des cultures.
- Plusieurs goutteurs peuvent être utilisés pour assurer une irrigation adéquate.
- À cause du coût d'installation élevé, cette technique d'irrigation est réservée pour l'irrigation des cultures à forte productivité et de haute qualité.
- Cette technique réduit les pertes d'eau et limite le gaspillage (rendement élevé). À cet effet, elle est recommandée si les ressources en eau sont limitées.
- Cette technique permet l'ajout immédiat des fertilisants (engrais) avec des doses bien définies au moyen des filtres qui peuvent être installés en amont du réseau, ce qui consiste un grand avantage par rapport aux autres techniques d'irrigations (par surface et par aspersion).

7.3 Schéma type d'une installation d'irrigation localisée

L'installation d'irrigation au goutte à goutte est considérée comme permanente (ne change pas pendant plusieurs saisons). Les éléments de cette installation sont (C.f Figure 6.2) :

§1 L'unité de pompage : elle puise l'eau depuis la source et la refoule à la pression désirée dans le réseau de distribution pour assurer le bon fonctionnement des goutteurs.

§2 L'unité de tête ou de contrôle en tête : est un ensemble d'organes permettant **le réglage de débits, des pressions et la qualité de l'eau d'irrigation**. Cette unité comporte des vannes régulatrices de débit et de pression qui peuvent être raccordées avec un fertiliseur (pour l'ajout des engrais sous forme dissoute) et un filtre d'eau (pour éviter le bouchage des goutteurs). Les filtres couramment utilisés sont les filtres à crépine ou les filtres à sable.

§3 Les canalisations principales, secondaires et rampes : pour le transport de l'eau depuis l'unité en tête et la délivrer aux champs d'irrigation. Elles sont en PVC ou en PEHD. Elles doivent être enterrées dans le sol pour éviter leur dégradation sous l'effet du rayonnement solaire. Les rampes sont des tuyaux de dimensions : diamètre intérieur/extérieur (mm) = 13/16, 14.5/17, 17/20, 22/25 (Tiercelin, 2006). Il existe des rampes qui assurent à la fois le transport de l'eau et sa distribution telles que les tuyaux poreux ou perforés (Vermeiren and Jobling, 1983b).

§4 Les goutteurs ou distributeurs : sont des dispositifs qui ont pour rôle de délivrer le débit désiré à la plante (C.f Figure 7.3).

- Les distributeurs peuvent être des goutteurs, ajutages, mini-diffuseurs ou des perforations dans une conduites.
- L'écartement courant des goutteurs est de 1 m environ. Pour les cultures en lignes, l'écartement des goutteurs est plus faible pour pouvoir humidifier la bande de terrain relative aux plantations.
- Un ou plusieurs goutteurs peuvent être prévus pour irriguer un arbre.
- Plusieurs types de goutteurs sont disponibles sur le marché. Ils sont conçu pour que le débit reste constant pour une large marge de pression, et en même temps ne se bouchant pas rapidement.

7.4 Cultures recommandées

L'irrigation au goutte à goutte convient surtout aux cultures en lignes (Tiercelin, 2006) :

- **Cultures fruitières :** agrumes, olive, pomme, raisin, ... etc ;
- **Légumes :** sous abri (sous serres) ou de plein champ ;
- **Grandes cultures :** coton, cannes à sucre, ... etc ;
- **Fleurs et autres.**

7.5 Types du sol et pentes adéquats

- Cette méthode d'irrigation s'adapte presque à tous les types du sol.
- En sols argileux, le débit des goutteurs ou distributeurs doit être faible pour éviter la stagnation de l'eau ou le ruissellement et pour avoir un profil d'humectation uniforme et efficace.
- En sols sableux, les goutteurs doivent avoir un débit fort pour que l'infiltration latérale des eaux soit suffisante.
- L'irrigation localisée s'adapte à tout terrain irrigable, mais de préférable, les plantes doivent être cultivées le long des courbes de niveau et les canalisations de distribution d'eau suivent aussi les courbes de niveau. Cette pratique a l'avantage de réduire les variations de pression de service des goutteurs résultant de l'irrégularité de la pente du terrain.

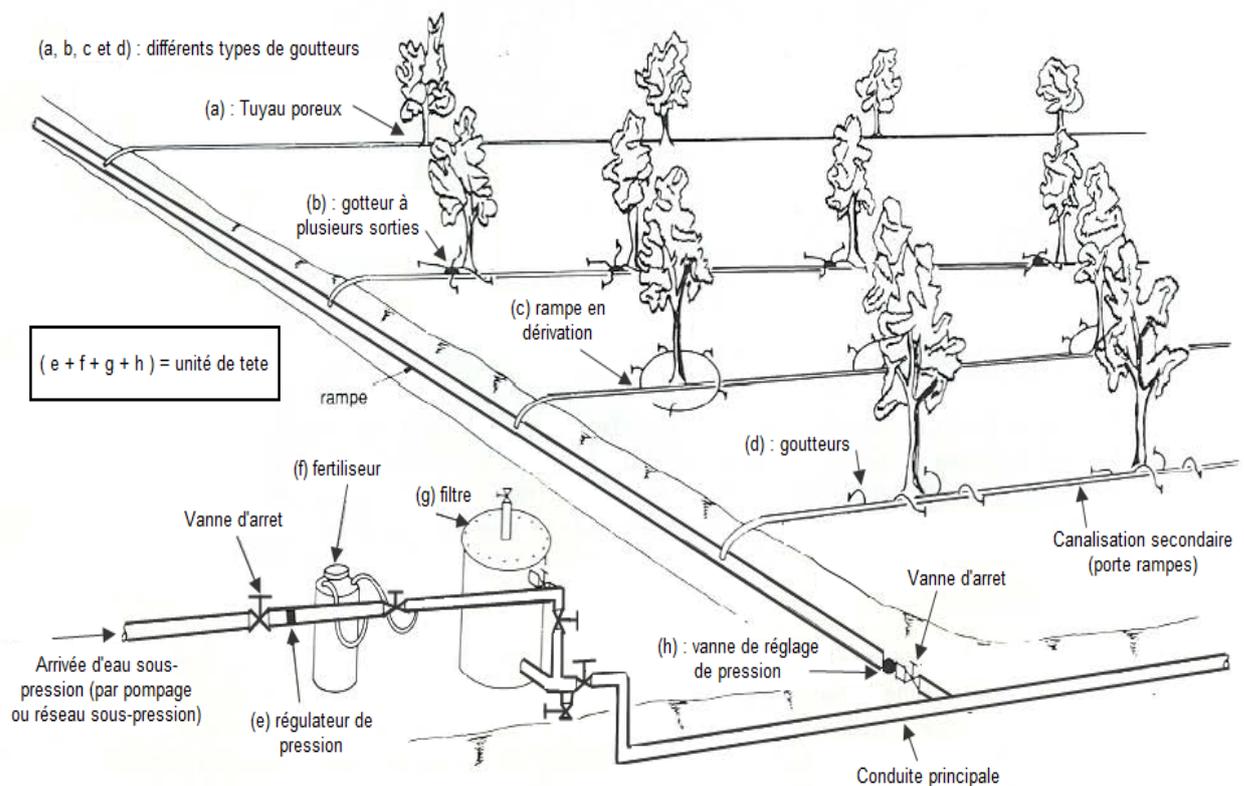


FIGURE 7.2 – Irrigation au goutte à goutte (seule la zone radiculaire est humidifiée)(Brouwer et al. (1990))

7.6 Avantages et inconvénients

7.6.1 Avantages de l'irrigation localisée

- Si l'installation goutte à goutte est bien conduite, elle peut économiser de 20 à 50% de l'eau par rapport l'irrigation de surface et par aspersion (Vermeiren and Jobling,

- 1983b). En effet, elle est très avantageuse dans les régions arides ou semi-arides. son efficience peut atteindre 90% à 95% (Tiercelin, 2006).
- Économie et dosage précis des engrais. Ce qui réduit considérablement les frais de l'investissement.
 - Économie de main-d'œuvre par rapport aux autres techniques d'irrigation. Si cette installation est bien réalisée, elle requiert peu de main-d'œuvre si l'eau est propre (dépourvue des MES). En effet, cette technique est avantageuse si la main d'œuvre qualifiée coûte cher.
 - Lutte facile contre les mauvaises herbes à cause de concentration de l'eau et engrais autour des racines seulement.
 - Possibilité d'irrigation par les eaux salées et protection de feuillage contre la brûlure causée par l'irrigation avec des eaux salées.
 - Irrigation des sols lourds dont la vitesse d'infiltration est inférieure à $3\text{mm}/h$, contrairement aux autres techniques.
 - Adaptation aux conditions difficiles du sol, pentes et climat.
 - Fonctionnement sous faible pression (de 1.0 à 2.0 bar généralement).
 - Possibilité d'automatisation de l'installation d'irrigation.

7.6.2 Inconvénients de l'irrigation localisée

- L'installation d'irrigation localisée nécessite une couverture totale de la parcelle par le réseau d'irrigation. De plus, cette installation est quasi-permanente.
- Développement limité des racines uniquement dans le bulbe (zone) irriguée. Ceci, contribue à la fragilité des plantes contre le stress hydrique (Verma et al., 2014).
- Sensibilité des goutteurs à l'obstruction par grains, dépôt de sels (carbonate de calcium) ou gels bactériens (Tiercelin, 2006). Pour éviter ce problème, la filtration de l'eau s'avère couramment nécessaire. Une autre solution consiste à remplacer les goutteurs de faibles diamètres par des mini-diffuseurs, micro-asperseurs ou des ajustages.
- Difficulté de contrôle du réseau goutte à goutte, notamment s'il est enterré.
- Ne convient pas à toutes les cultures, notamment celles qui requièrent un environnement humide (Kiwi par exemple).
- Fruits et feuilles ne sont pas lessivés de la poussière.

7.7 Qualité de l'eau

- Le problème majeur de l'irrigation au goutte à goutte est le risque d'obstruction (le bouchage) des goutteurs. La section de passage des eaux dans les goutteurs qu'on trouve sur le marché est très faible (diamètre de 0,2 à 2,0 mm). Par suite, ces goutteurs risquent de se boucher si l'eau n'est pas propre. Par conséquent il est essentiel que l'eau soit dépourvue de toute matière solide en suspension, autrement dit la filtration de l'eau est obligatoire.
- L'obstruction des goutteurs peut aussi provenir du dépôt des matières organiques,

des algues, des dépôts d'engrais ou des engrais non dissous tels que le calcium et le fer. La filtration peut éliminer les matières en suspension, les algues et les matières organiques, mais la prévention contre toutes les causes de blocage nécessite le recours à des spécialistes, ou bien le concours du fournisseur du matériel d'irrigation.

- La salinité de l'eau ne constitue pas un obstacle à l'utilisation de l'irrigation au goutte à goutte.



FIGURE 7.3 – Quelques types de goutteurs

7.8 Profils d'humectation

La zone humidifiée avec l'irrigation au goutte à goutte est seulement la zone racinaire des plantes, qu'on appelle aussi le "bulbe humide". Par rapport aux autres méthodes d'irrigation, la zone humectée ne constitue que 30% de volume du sol par rapport aux autres techniques d'irrigation. La forme de la zone humectée dépend de type du sol et de débit du goutteurs.

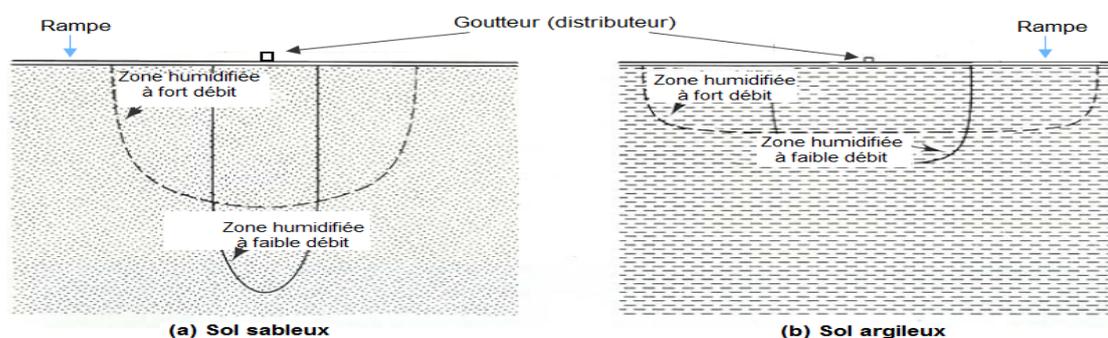


FIGURE 7.4 – Profils d'humectation en fonction de type du sol et de débit du goutteur (Brouwer et al. (1990))

7.9 Calcul d'une installation d'irrigation localisée

7.9.1 Besoin en eau des cultures en irrigation localisée

L'irrigation localisée est utilisée pour irriguer les cultures en ligne plantées d'une façon séparée en laissant certaine distance entre deux plantes voisines. Le calcul des besoins en eau a été établi initialement pour les cultures denses irriguées par surface ou par aspersion. En effet,

les pertes d'eau engendrées par l'évaporation directe du sol et la transpiration des adventices sont tenues en considération dans le calcul du besoin net. Pour réduire ces pertes, **le coefficient de réduction (ou coefficient de couverture)** K_r est introduit.

— Formule de Keller et Karmeli (1974) :

$$K_r = \frac{CS}{0.85} \quad \text{avec } K_r \leq 1 \quad (7.1)$$

— Formule de Decroix :

$$K_r = 0.1 + CS \quad \text{avec } K_r \leq 1 \quad (7.2)$$

Tel que CS est le taux de couverture du sol par le feuillage des plantes.

§1 Besoin en eau d'irrigation net (B_{net}) :

$$B_{net} = ETM \times K_r \quad (7.3)$$

Tel que ETM est l'évapotranspiration maximale considérée (mm).s

§2 Besoin en eau d'irrigation brut (B_{brut}) : C'est le volume ou la hauteur d'eau d'irrigation nécessaire en pratique y compris les pertes et le volume de lessivage du sol, mais à l'exception des autres ressources en eaux :

$$B_{brut}(mm) = B_{net}(mm) \times R_p + L_r(mm) \quad (7.4)$$

Tels que :

- R_p : rendement de l'irrigation à la parcelle ;
- L_r : hauteur d'eau (volume) pour lessivage du sol.

Le rendement de l'irrigation à la parcelle est défini **théoriquement** par la relation suivante :

$$R_p = E_f \times CU \quad (7.5)$$

Avec :

- E_f : efficacité du réseau d'irrigation, égale le rapport entre la quantité d'eau stockée dans la zone racinaire (en moyenne) / l'eau apportée (en moyenne). $E_f \leq 1.0$.
- CU : coefficient d'uniformité de l'irrigation. Il traduit l'uniformité de la distribution de l'eau sur la parcelle ($CU < 1$).

Théoriquement, l'irrigation localisée ne doit pas provoquer des pertes d'eau par ruissellement et/ou percolation profonde. Cependant, pour assurer une bonne irrigation des sols de forte perméabilité (sols sableux par exemple), une quantité d'eau supplémentaire est à apporter

pratiquement. La manière la plus simple pour exprimer ces pertes est d'inverser le rendement R_p (Eq.7.6) :

$$\text{Nouveau } R_p \rightarrow \frac{1}{R_p} \quad (7.6)$$

7.9.2 Dose nette d'arrosage D_{nette}

En irrigation localisée la dose d'arrosage est réduite par un coefficient P . Il représente la fraction du sol à humidifier. P dépend de la nature du sol, du débit, l'espacement des goutteurs, l'écartement des rampes, la pluviométrie de la région, ... etc. Le coefficient P varie dans l'intervalle [0.2, 1].

$$D_{nette}(mm) = (HCC - HPP) \times e \times Z \times \frac{P}{100} \quad (7.7)$$

Tels que :

- $D_{nette}(mm)$: hauteur d'eau maximale à apporter par irrigation en tenant compte que la surface du sol est irriguée partiellement ;
- $e(\%)$: degré d'extraction de l'eau du sol ;
- $Z(mm)$: profondeur des racines ;
- P : volume du sol humidifié exprimé en pourcentage (%) du volume total.

$$P = \frac{n \times S_{pd} \times S_h}{S_a \times S_r} \quad (7.8)$$

- n : nombre de points de distribution par arbre (ou plante) (figure 7.5) ;
- S_{pd} : distance entre deux points de distribution voisins du même arbre (figure 7.5) ;
- S_h : largeur de la bande humidifiée (figure 7.5) ;
- S_r : écartement entre rangs d'arbre (figure 7.5) ;
- S_a : espacement des arbres sur les rangs (figure 7.5).

7.9.3 Fréquence d'arrosage (espacement maximal entre arrosage) f

$$f = \frac{D_{nette}(mm)}{ETM_{max}(mm)} \quad (7.9)$$

Tel que :

- ETM_{max} : l'évapotranspiration maximal du calendrier d'irrigation.

7.10 Application

Calculer l'installation d'irrigation localisée pour le cas suivant :

- Évapotranspiration potentielle $ET_o = 8mm$;
- Coefficient culturel $K_c = 1.05$;
- Taux de couverture du sol par le couvert végétale $CS = 60\%$;

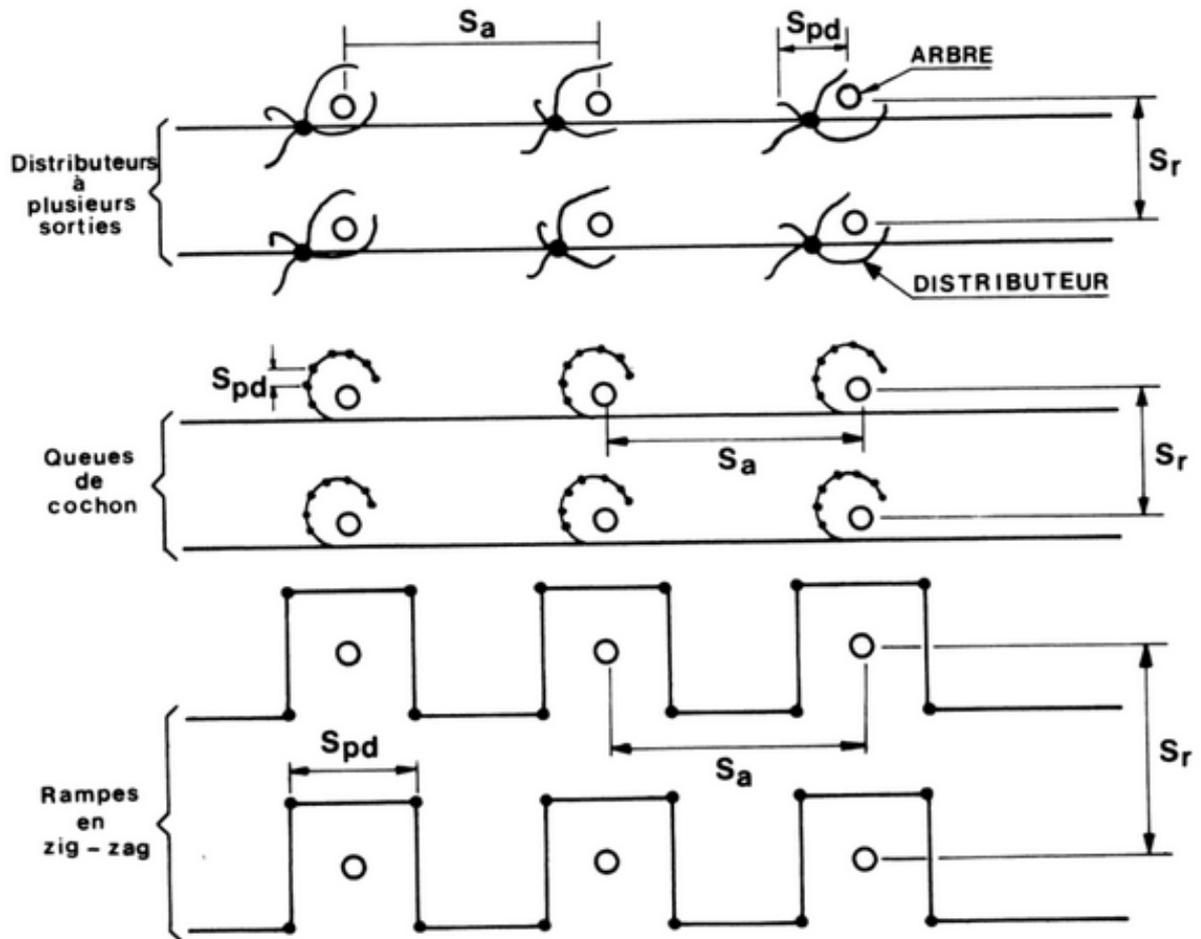


FIGURE 7.5 – Schéma d'installation d'irrigation goutte à goutte (Vermeiren and Jobling, 1983a)

- Efficience du réseau d'irrigation $E_f = 0.85$;
- Coefficient d'uniformité de l'irrigation $CU = 0.82$;
- Humidité à la capacité au champ $HCC = 30\%$;
- Humidité au point de flétrissement $HPF = 12\%$;
- Degré d'extraction de l'eau du sol $e(\%) = 66\%$;
- Profondeur des racines $Z = 1.1m$;
- Nombre de points de distribution par arbre $n = 2$;
- Distance entre deux points de distribution voisins du même arbre $S_{pd} = 1m$;
- Largeur de la bande humidifiée $S_h = 3m$;
- Écartement entre rangs d'arbre $S_r = 4m$;
- Espacement des arbres sur les rangs $S_a = 4m$.

Solution :

§1 Besoin en eau d'irrigation net (B_{net}) :

$$ETM = K_c \times ET_o = 1.05 \times 8 = 8.4mm \quad (7.10)$$

Formule de Keller et Karmeli (1974) :

$$K_r = \frac{CS}{0.85} = \frac{0.60}{0.85} = 0.71 \quad (7.11)$$

$$B_{net} = ETM \times K_r = 8.4 \times 0.71 = 5.93mm \quad (7.12)$$

§2 **Besoin en eau d'irrigation brut (B_{brut}) :**

$$R_p = E_f \times CU = 0.85 \times 0.82 = 0.70 \rightarrow R_p = \frac{1}{0.70} = 1.43 \quad (7.13)$$

$$B_{brut} = B_{net} \times R_p = 5.93 \times 1.43 = 8.51mm \quad (7.14)$$

§3 **Dose nette d'arrosage D_{nette} :**

$$P = \frac{n \times S_{pd} \times S_h}{S_a \times S_r} = \frac{2 \times 1 \times 3}{4 \times 4} = 0.375 = 37.5\% \quad (7.15)$$

$$D_{nette}(mm) = (HCC - HPPF) \times e \times Z \times \frac{P}{100} = \frac{30 - 12}{100} \times 0.66 \times (1.1 \times 1000) \times \frac{37.5}{100} = 49.01mm \quad (7.16)$$

§4 **Fréquence d'arrosage f**

$$f = \frac{D_{nette}(mm)}{ETM_{max}(mm)} = \frac{49.01}{8.4} = 5.83 \rightarrow f = 6 \text{ jours} \quad (7.17)$$

7.11 Sommaire

À travers ce chapitre, on peut conclure les points suivants :

- L'irrigation localisée est une technique très économique en eau et en engrais. Son rendement est très élevé ;
- La technique permet le dosage précis des engrais ;
- L'irrigation localisée s'adapte bien avec tous types du sol pratiquement, de très faible ou très forte vitesse d'infiltration ;
- La technique est recommandée pour les cultures en ligne et l'arboriculture, mais pas pour les cultures denses telles que les céréales ;
- Cette méthode requiert la maîtrise du matériel d'irrigation, donc une main d'œuvre qualifiée.
- Elle est recommandée lorsque :
 1. le terrain est accidenté ou à forte pente ;
 2. ressource en eau chère ou rare ;
 3. main d'œuvre chère ou rare ;
 4. mauvaise qualité de l'eau.

Chapitre 8

Choix de la méthode d'irrigation

8.1 Introduction

Le choix judicieux de la méthode d'irrigation optimale n'est pas assez simple. Pour le même cas, plusieurs techniques sont possibles (par surface, par aspersion ou goutte à goutte), et chacune a ses avantages et ses inconvénients. Dans ce qui suit, certains facteurs du choix sont discutés.

8.2 Conditions naturelles

8.2.1 Types du sol

- **En sols sableux** : ces sols sont caractérisés par une perméabilité importante et une faible capacité de rétention (RU et RFU). L'irrigation par aspersion ou localisée (goutte à goutte) sont les plus recommandées. Ainsi que l'espacement entre cultures doit être réduit le maximum possible à fin d'éviter les pertes d'eau et pour augmenter le rendement.
- **En sols limoneux ou argileux** : Les trois méthodes sont possibles. L'irrigation de surface ou par aspersion peuvent être utilisées mais en évitant les pertes par ruissellement et l'érosion du sol.
- Pour les sols hétérogènes dans le même périmètre, l'irrigation localisée ou par aspersion sont recommandées.

8.2.2 La pente du sol

- **Terrain à forte (ou moyenne) pente** : L'irrigation localisée est plus recommandée. L'irrigation par aspersion est possible si la pente est réduite en travaillant le sol. L'irrigation de surface n'est pas possible, sauf si la pente est réduite jusqu'à avoir un terrain relativement plat.
- **Terrain à faible pente** : les 03 systèmes d'irrigation sont possibles.

8.2.3 Le climat

- **Les régions à vents forts** : L'irrigation par surface ou localisée sont préférables, mais l'irrigation par aspersion est à éviter à cause de déformation des trajectoires de jet d'eau.

8.2.4 La disponibilité de l'eau

- Si l'eau est disponible en quantité limitée, l'irrigation par aspersion ou par goutte à goutte est préférée par rapport à l'irrigation de surface. Cela se justifie par le rendement relativement élevé des deux méthodes (aspersion ou localisée) face à l'irrigation par surface ainsi la quantité relativement faible utilisée.

8.2.5 La qualité d'eau d'irrigation

- Si l'eau utilisée est chargée par les sédiments, la technique d'irrigation par surface est préférée par rapport aux autres à cause de problème d'obstruction des asperseurs et des arroseurs.
- Si l'eau est saline (forte teneur en sels), l'irrigation au goutte à goutte est particulièrement préférée. En effet, comme l'eau est fournie aux pieds des plantations, la salinité du sol ne sera pas affectée fortement par l'irrigation à l'eau saline.

8.3 Les types de cultures pratiquées

8.3.1 Le types de cultures

- Selon les cultures à irriguer, certaines ne supportent pas le gel ou l'immersion de ses feuilles par l'eau ou ses collets pendant une longue durée. Dans ce cas, l'irrigation par goutte à goutte ou par surface peuvent être appropriées.

8.3.2 La valeur financière de la production

- Les méthodes d'irrigation par aspersion et au goutte à goutte sont principalement adaptées à l'irrigation des cultures à haute valeur financière telles que les légumes et les arbres fruitiers à cause de coûts d'investissement importants. Ces techniques sont rarement utilisées pour les cultures de faible valeur financière.

8.3.3 La disposition des plantes

- L'irrigation au goutte à goutte est très recommandée pour l'irrigation des plantations individuelles, les arbres et les cultures en lignes, telles que les légumes et la canne à sucre. Elle n'est pas utilisée pour l'irrigation des plantations denses telles que les champs du blé, les rizières, ... etc.

8.4 Le niveau de technicité, les traditions et la main d'œuvre

8.4.1 Le niveau de technicité

- L'irrigation par surface n'exige pas un niveau de maîtrise (technicité) élevé des ouvriers. Tandis que l'irrigation par aspersion et localisée exigent la maîtrise de l'exploitation des installations (pompes, asperseurs, buses, arroseurs, filtres, fertilisants, accessoires, ... etc) ainsi la maintenance locale des équipements en cas de panne maîtrisable.
- L'irrigation par aspersion et localisée nécessitent l'approvisionnement régulier en pièces de rechange ainsi l'assurance du montage local afin d'assurer la continuité de fonctionnement du système d'irrigation sans recourir aux spécialistes, sauf pour les cas de pannes complexes.

8.4.2 Les traditions d'irrigation

- Le choix d'une méthode d'irrigation dépend des traditions des irrigations dans la région ou dans le pays. L'introduction d'une nouvelle méthode d'irrigation peut amener des difficultés inattendues. Généralement, l'adoption des nouvelles techniques d'irrigation n'est pas assez facile pour les agriculteurs. La gestion des équipements sera aléatoire, et les frais seront trop élevés comparés aux bénéfices dans le cas d'une mauvaise exploitation de la nouvelle technique d'irrigation.

8.4.3 La disponibilité de la main d'œuvre

- Les besoins en main d'œuvre pour l'aménagement, le fonctionnement et l'entretien des projets d'irrigation de surface sont toujours supérieurs à ceux des projets d'irrigation par aspersion ou au goutte à goutte.
- L'irrigation de surface nécessite des travaux de préparation de terrain (nivellement) assez soignés, un entretien régulier et une bonne conduite des irrigations pour assurer le bon fonctionnement du réseau. En aspersion ou au goutte à goutte, les travaux de préparation du terrain sont très minimes, et les besoins en main d'œuvre pour le fonctionnement et l'entretien des réseaux sont moins importants que pour l'irrigation de surface.

8.5 Coût et bénéfices

- Avant de choisir une méthode d'irrigation, il faut faire une estimation des coûts, des bénéfices et des avantages de chaque option.
- L'estimation des coûts ne se limite pas aux coûts des travaux et d'installation, mais elle tient compte aussi des frais de fonctionnement et d'entretien (à l'hectare) résumés en frais d'exploitation.
- Les coûts doivent être ensuite comparés aux bénéfices (exprimés en pourcentage des investissements). Il est clair que les agriculteurs ne choisiront que l'alternative économiquement viable.

Bibliographie

- Ali, H.** (2010). *Fundamentals of irrigation and on-farm water management : Volume 1*, volume 1. Springer Science & Business Media.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., et al.** (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations*, volume 56(97) :page e156.
- Asawa, G.** (2006). *Irrigation and water resources engineering*. New age international.
- Brouwer, C., Prins, K., Kay, M., and Heibloem, M.** (1990). Méthodes d'irrigation. *Gestion des Eaux en Irrigation. Manuel de Formation*.
- Calvet, R.** (2003). *Le sol : propriétés et fonctions. Phénomènes physiques et chimiques, applications agronomiques et environnementales*. Number v. 2 in *Le sol : propriétés et fonctions*. Editions France Agricole. ISBN 9782855570846.
- Calvet, R.** (2005). *Les pesticides dans le sol : conséquences agronomiques et environnementales*. Référence scientifique. Editions France Agricole. ISBN 9782855571195.
- CLÉMENT, R. and MEYLAN, J.** (1978). Systèmes d'irrigation. *Techniques de l'Ingénieur*, volume 48.
- Davet, P.** (1996). *Vie microbienne du sol et production végétale*. Mieux comprendre. Quae. ISBN 9782738006486.
- Duchaufour, P.** (1998). *Handbook of Pedology*. Taylor & Francis. ISBN 9789054107828.
- Gobat, J., Aragno, M., and Matthey, W.** (2010). *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*. Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 9782880747183.
- LAGACÉ, R.** (2015). *DRAINAGE, Notes de cours*. Université laval, canada. édition. URL http://www.grr.ulaval.ca/gae_3001/Documents/Notes_2015/Doc_GAE_3001.pdf.
- MASSENET, J.Y.** (2012a). *Cours de pédologie forestière - Chapitre IV : Propriétés physiques du sol*. URL <http://jymassenet-foret.fr/courspedologie.html>.

- MASSENET, J.Y.** (2012b). *Cours de pédologie forestière - Chapitre V : Propriétés chimiques du sol*. URL <http://jymassenet-foret.fr/courspedologie.html>.
- Mupala, G.M.** (2019). *Eléments de pédologie générale et intertropicale : Analyse critique et nouvelles orientations de politique économique*. Editions L'Harmattan.
- Musy, A. and Soutter, M.** (1991). *Physique du sol*. Collection Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 9782880742119.
- Rieul, L., Centre national du machinisme agricole, du génie rural, d.e.e.d.f.F., and Ruelle, P.** (2003). *Irrigation : guide pratique*. Guide pratique - CEMAGREF-DICOVA. Cemagref. ISBN 9782853625920.
- Soltner, D.** (1992). *Les bases de la production végétale, Tome 1 : Le sol et son amélioration*. Sciences Et Techniques Agricoles. ISBN 9782907710008.
- Tiercelin, J.** (2006). *Traité d'irrigation. : 2è édition*. Tec & Doc Lavoisier. ISBN 9782743009106.
- Verma, S., Shrivastava, A., and Jha, J.** (2014). *Irrigation Resources*. SCIENTIFIC PUBLISHER (IND. ISBN 9789386237415.
- Vermeiren, L. and Jobling, G.** (1983a). *L'irrigation localisée : calcul, mise en place, exploitation, contrôle du fonctionnement*. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. ISBN 9789252009863.
- Vermeiren, L. and Jobling, G.** (1983b). *L'irrigation localisée : calcul, mise en place, exploitation, contrôle du fonctionnement*. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. ISBN 9789252009863.
- Waller, P. and Yitayew, M.** (2015). *Irrigation and Drainage Engineering*. Springer International Publishing. ISBN 9783319056999.