

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE

Département de Science des Sols



COURS IRRIGATION ET DRAINAGE

À l'usage des étudiants de 5^{ème} année de la section de spécialisation en Science des Sols.



S. HADJ-MILOUD, Maître de Conférence

Février 2026

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE

Département de Science des Sols

COURS IRRIGATION ET DRAINAGE

À l'usage des étudiants de 5^{ème} année de la section de spécialisation en Science
des Sols.

S. HADJ-MILOUD, Maître de Conférence

Février 2026

TABLE DES MATIERES

Introduction	6
CHAPITRE I : LA CONDUITE DE L'IRRIGATION	8
1. LES OBJECTIFS	8
1.1. Effets de l'irrigation sur les rendements	9
1. 2. La détermination des besoins en eau des cultures	10
1. 3. Détermination des quantités d'eau apportées à la culture	15
1.4. Les paramètre de l'irrigation	20
2. Le débit caractéristique	22
2.2. Détermination du débit caractéristique	23
3. LES SYSTEMES D'IRRIGATION	24
3.1. Les systèmes d'irrigation de surface	25
3.2. La micro-irrigation	26
3.3. L'irrigation par aspersion	27
3.4. L'irrigation gravitaire	29
3.5. L'irrigation par bassin	29
3.6. L'irrigation à la raie ou par rigole	29
3.7. Efficience de l'irrigation	29
3.8. La performance de l'irrigation	30
3.9. L'irrigation souterraine	30
4. MINI PROJET D'IRRIGATION	31
CHAPITRE II : QUALITE DES EAUX D'IRRIGATION ET IRRIGATION EN MILIEU SALE	34
1. LES PRINCIPAUX SELS SOLUBLES	36
2. LES PROBLEMES ENGENDRES PAR LES SELS	37
3. CLASSIFICATIONS DES EAUX D'IRRIGATION	40
4. LA FRACTION DE LESSIVAGE (FL)	44
CHAPITRE III : LE DRAINAGE	45
1. DEFINITION	45

2. BUT DU DRAINAGE	45
3. EFFETS DES EXCES D'EAU SUR LE SOL	45
4. PRINCIPALES METHODES DE DRAINAGE	48
5. BESOINS EN DRAINAGE	51
6. DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU DE DRAINAGE	51
6.1. Les paramètres de dimensionnement	51
6.2. Calcul de l'écartement des drains	52
6.3. Caractéristiques géométriques des drains	53
7. MINI PROJET DE DRAINAGE	54
CONCLUSION	56
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	57

Liste des figures

Figure 1 : Comparaison des rendements d'une culture de blé en irrigué et en non irrigué	9
Figure 2 : Courbe de coefficients culturaux et définition des phases	12
Figure 3 : Méthode indirecte pour le calcul de l'ETP (formules empiriques)	14
Figure 4 : Effet de la texture du sol sur la teneur en eau du sol et le potentiel hydrique	19
Figure 5 : Variation des besoins journaliers des plantes	23
Figure 6 : Les principaux systèmes d'irrigation	25
Figure 7 : Liaison entre dispersion et teneur relative du complexe adsorbant en sodium	38
Figure 8 : Essais de percolation avec de l'eau salée puis de l'eau distillée	39
Figure 9 : Classification des eaux d'irrigation par Riverside	43
Figure 10 : Effet de la durée d'engorgement des sols sur la productivité pour la culture de Betterave	46
Figure 11 : Effet de la durée d'engorgement des sols sur la productivité pour la culture de Maïs	47
Figure 12 : Réalisation des galeries taupe	50
Figure 13 : Représentation schématique des principales variables pour la mise en place d'un réseau de drainage	52

Liste des photos

Photo 1 : Tensiomètre	15
Photo 2 : Irrigation à la raie	26
Photo 3 : La micro-irrigation (goutte à goutte)	38
Photo 4 : Irrigation par aspersion	28
Photo 5 : Drainage par fossés à ciel ouvert	48
Photo 6 : Drain perforé enterré	49

Liste des tableaux

Tableau I : Exemple de coefficients culturaux (cas du blé)	12
Tableau II : Besoins journaliers (mm) en eau d'appoint (régions tempérées)	23
Tableau III : Besoins journaliers (m ³ /ha) en eau d'appoint (régions tempérées)	24
Tableau IV : Classes de salinité de l'eau (Durand 1960)	41
Tableau V : Classes du danger d'alcalinisation du sol (SAR)	42
Tableau VI : Classes des eaux d'irrigation issues de la projection sur le diagramme de Riverside, modifié	43
Tableau VII : Valeur optimale de la profondeur de la nappe en fonction du type de sol et de la culture	47

INTRODUCTION

Lorsque les précipitations ne suffisent pas, l'irrigation s'impose comme une solution indispensable pour maintenir une humidité optimale du sol et répondre aux besoins hydriques des cultures (Bioconf, 2025).

Par ailleurs, l'irrigation est considérée comme un moteur essentiel de la sécurité alimentaire, du maintien des moyens de subsistance dans les zones rurales et du bon fonctionnement des agroécosystèmes (Matsoukis, 2025). De même, l'irrigation est un élément crucial de l'agriculture moderne, une gestion efficace de l'irrigation est essentielle pour garantir la durabilité à long terme des pratiques agricoles (Lee, 2025).

L'usage de l'irrigation engendre de nombreux avantages :

- Augmentation de la superficie des surfaces cultivées (zones arides).
- Amélioration des rendements et d'une façon générale intensification et stabilisation de la production.
- L'irrigation fournit un approvisionnement régulier en eau, permettant des rendements bien plus élevés, même dans des zones à pluviométrie irrégulière ou insuffisante (FAO, 2025).
- La stabilisant la production agricole, l'irrigation diminue les éventuelles pertes de récolte et renforce la disponibilité alimentaire (Domènech, 2015).
- Les techniques modernes (goutte-à-goutte, irrigation de précision) réduisent les pertes et augmentent le volume de récolte par unité d'eau irriguée (Yang, 2019).

Cependant, avec l'irrigation, l'agriculteur dispose d'un puissant levier pour accroître et régulariser la production de ses cultures, à condition de maîtriser son irrigation, afin de satisfaire les objectifs techniques (rendement) et économiques (coût optimal) visés.

Les techniques modernes d'irrigation permettent aussi en même temps de fertiliser les sols (ferti-irrigation).

En Algérie, la superficie irriguée est de l'ordre de 720.000 ha (MADR, 2018), répartie comme suit :

- 200.000 ha dans les régions sahariennes, sur une superficie agricole utile de 8.265.259 ha soit près de 8,6% de la surface agricole utile (SAU).
- 520.000 ha irrigués dans le Nord du pays (soit 6,3% de la SAU).

Actuellement, l'objectif visé par l'Algérie est d'atteindre une superficie irriguée de 1,3 à 2 millions d'ha en 202, toutefois, cet objectif n'a pas encore été concrétisé. Pour ce faire, une bonne maîtrise de l'irrigation s'impose.

La bonne maîtrise de l'irrigation doit répondre à trois questions majeures :

- Quand arroser ?
- Combien d'eau apporter ?
- Comment l'apporter ?

L'irrigation doit être accompagnée d'un drainage pour éliminer les excédents de l'eau d'irrigation et éviter les remontées de nappe. Le drainage évite l'excès d'eau dans la zone racinaire, qui peut empêcher l'accès à l'oxygène, provoquer la mort des plantes et réduire drastiquement les rendements (Madramootoo, 2000). Un drainage bien conçu une lixiviation des sels accumulés après irrigation, améliorant la croissance des plantes et la santé du sol (van Hoorn and Alphen, 2006). Par conséquent, les terres impropres deviennent cultivables, avec des rendements accrus et une exploitation plus rentable des parcelles (Singh, 2019).

En revanche, en diminuant le ruissellement, le drainage limite le transport de sédiments et de polluants vers les rivières (Sands, 2018).

Le drainage permet de gérer la profondeur de la nappe, favorisant une irrigation plus efficace, réduisant les pertes et améliorant les rendements (Skaggs, 2012; Mustafa, 2020).

Toutefois, il convient de souligner que la connaissance des caractéristiques pédologiques tel que les propriétés physiques du sol, constitue un élément essentiel pour le dimensionnement adéquat d'un réseau de drainage.

Le présent document constitue un support pédagogique destiné aux étudiants de 5^{ème} année en sciences du sol. Il présente les notions fondamentales liées à l'irrigation et au drainage, en mettant particulièrement l'accent sur les propriétés du sol intervenant dans la compréhension de ces deux aspects.

CHAPITRE I : LA CONDUITE DE L'IRRIGATION

La conduite de l'irrigation consiste à définir pour chaque arrosage la date et la dose jugée optimale pour une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation. Il s'agit donc d'optimiser l'usage de la ressource hydrique car :

- elle se raréfie,
- sa mobilisation est coûteuse,
- et son usage doit se faire dans le cadre d'une agriculture durable et respectueuse de l'environnement.

L'optimisation de l'utilisation de l'eau en irrigation est nécessaire car :

* le manque d'eau provoque sur le végétal :

- le flétrissement,
- le jaunissement et
- la chute de rendement.

*Un excès d'eau provoque :

- l'asphyxie des racines dans les sols lourds et non drainants,
- la perte en rendement,
- la détérioration de la qualité du produit et
- une perte financière en raison du coût de l'eau et du lessivage des éléments fertilisants.

1. LES OBJECTIFS

Les objectifs d'un pilotage de l'irrigation sont :

- d'éviter le stress hydrique sur l'ensemble du cycle (stress utile)
- de rentabiliser le mètre cube d'eau donné (éviter l'engorgement, la percolation et le ruissellement)
- de faire participer au maximum la réserve en eau du sol
- d'intégrer l'irrigation avec d'autres opérations culturales, afin de minimiser les pertes des éléments nutritifs par lessivage (surtout les nitrates).

1.1. Effet de l'irrigation sur les rendements

Les rendements peuvent être affectés par plusieurs phénomènes dont les plus importants sont la salinité, les mauvaises herbes, mauvaise gestion des sols, la conduite de la culture et le manque d'eau.

La figure 1 montre clairement que l'irrigation a fait doubler les rendements du blé dans la station expérimentale de Khemis Miliana. Ce dernier passe de 30 q/ha à 60 q/ha lorsque nous appliquons une irrigation (figure 1).

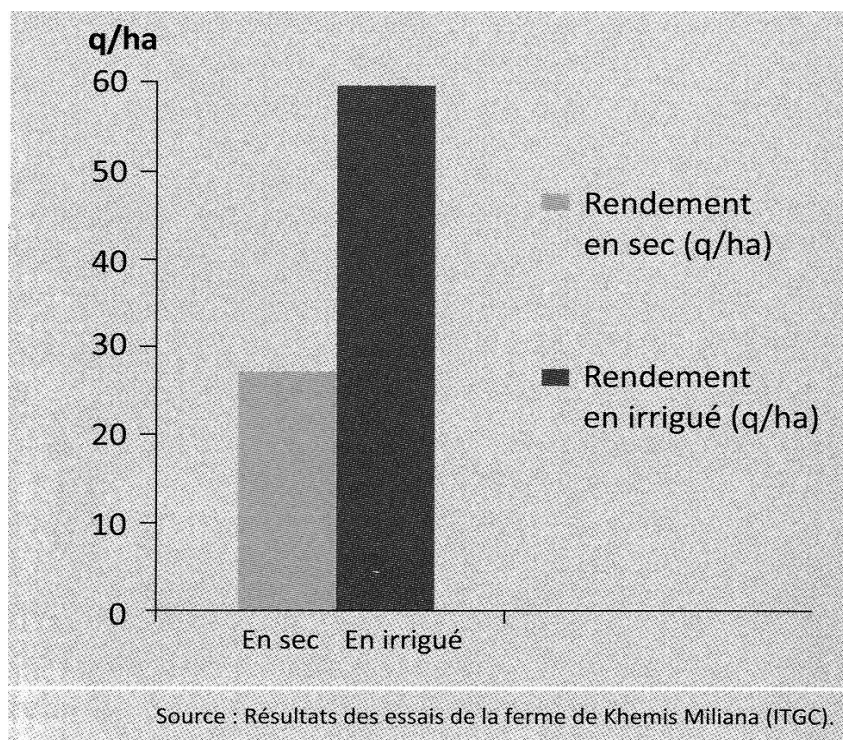


Figure 1 : Comparaison des rendements d'une culture de blé en irrigué et en non irrigué

L'eau, qu'elle soit pluviale ou d'irrigation, est un intrant indispensable à la production agricole. En retour, l'agriculture a un impact sur l'état quantitatif et qualitatif des ressources en eau. A partir du début des années 1960, le développement d'une agriculture intensive s'est traduit par une forte augmentation de la consommation d'engrais chimiques, de produits phytosanitaires et d'eau d'irrigation.

1.2. Détermination des besoins en eau des cultures

Les besoins en eau des cultures correspondent à la quantité d'eau nécessaire pour compenser les pertes dues à l'évapotranspiration d'une parcelle cultivée pendant une période donnée. Ils sont utilisés à des fins de gestion, notamment pour estimer les besoins en eau d'irrigation, planifier les calendriers d'irrigation et organiser la distribution de l'eau (Todorović, 2005).

Cependant, la gestion de l'irrigation est la plus importante, à titre d'exemple, la consommation journalière en période de pointe atteint 12,9 mm/j et l'ETM cumulée de la culture est équivalente à 885 mm en moyenne (Laaboudi et al., 2004). A été montré que les valeurs du coefficient cultural (K_c) progressent durant les premiers stades végétatifs de la plante.

Dans un premier temps, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant aussi bien la plante elle-même que les données climatiques et pédologiques de la région.

Selon Doorenbos et Pruitt (1975), le climat est l'un des facteurs qui influent le plus sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration (ETP). Cependant, les pratiques agronomiques, les techniques d'irrigation, les infestations dues aux insectes et aux maladies peuvent aussi influencer le taux d'évapotranspiration.

Pourquoi déterminer les besoins en eau des cultures ?

Connaître la valeur des besoins en eau des cultures est à la base des paramètres suivants :

- Projet d'irrigation : conception des réseaux d'irrigation (calcul du débit de dimensionnement des ouvrages)
- Gestion des réseaux d'irrigation pour les prévisions à court terme (programmation des apports d'eau),
- Pilotage des irrigations
- Planification de l'utilisation des ressources hydrauliques : volume d'eau nécessaire pour l'irrigation, surfaces irrigables au vu des ressources.

En matière d'irrigation, on cherche à placer les plantes dans des conditions de production optimales et on base l'irrigation sur la valeur de l'évapotranspiration maximale (ETM) qui est

une valeur ponctuelle liée à l' ET_0 (évapotranspiration de référence) qui est relative à une région par un coefficient cultural, donnée par la formule de base de l'approche climatique :

$$ETM = Kc \times ET_0$$

ETM : évapotranspiration maximale d'une culture (mm) :

Kc : coefficient cultural

ET_0 : (mm).

ET_0 : c'est l'évapotranspiration à partir d'une surface de référence, ce que l'on appelle l'évapotranspiration de la culture de référence ou l'évapotranspiration de référence, notée ET_0 . La surface de référence est une herbe de référence hypothétique avec une hauteur de récolte supposée de 0,12 m, une résistance de surface fixe de 70 s/m et un albédo de 0,23 (FAO, 1998).

L'intensité d'évapotranspiration d'une culture qui se situe dans un milieu donné dépend d'un ensemble de facteurs. D'une part, les facteurs physiques qui sont essentiellement liés au climat du milieu dans lequel se trouve la culture en question (la température, l'hygrométrie de l'air, la vitesse du vent et l'insolation) et d'autre part, les facteurs biologiques liés à la plante et qui interviennent dans le niveau de transpiration. (la surface foliaire (LAI), le stade phénologique, ...).

Remarque importante : Ne pas confondre entre les besoins en eau des cultures et les besoins en eau d'irrigation.

Les besoins en eau des cultures est le produit du coefficient cultural et l' ET_0 . Donc, il dépend du climat et de la culture considérée. En revanche, les besoins en eau d'irrigation, dépendent uniquement des caractéristiques du sol.

A- Choix du coefficient cultural

Par définition, le coefficient cultural (Kc) est le rapport entre l'évapotranspiration de la culture (ETM) et l'évapotranspiration de référence (ET_0), il intègre les effets des 4 caractéristiques primaires qui distinguent une culture de la culture de référence qui sont la hauteur de la culture, la résistance de surface sol-végétation (influencée par la surface foliaire, la proportion de sol couverte par la végétation, l'âge et l'état des feuilles, le degré de régulation stomatique, et l'humidité de la surface du sol). Cette résistance du sol est liée à la couleur du sol entre autres, ce qui va influencer l'albédo et l'évaporation du sol (Allen et al, 1998).

Afin de faciliter les calculs, les facteurs liés à la plante sont représentés par un facteur de correction K_c qui augmente généralement avec le développement de la plante et diminue à la fin de son cycle végétatif (figure 2). K_c est généralement maximum au moment de la reproduction (figure 2 et tableau I).

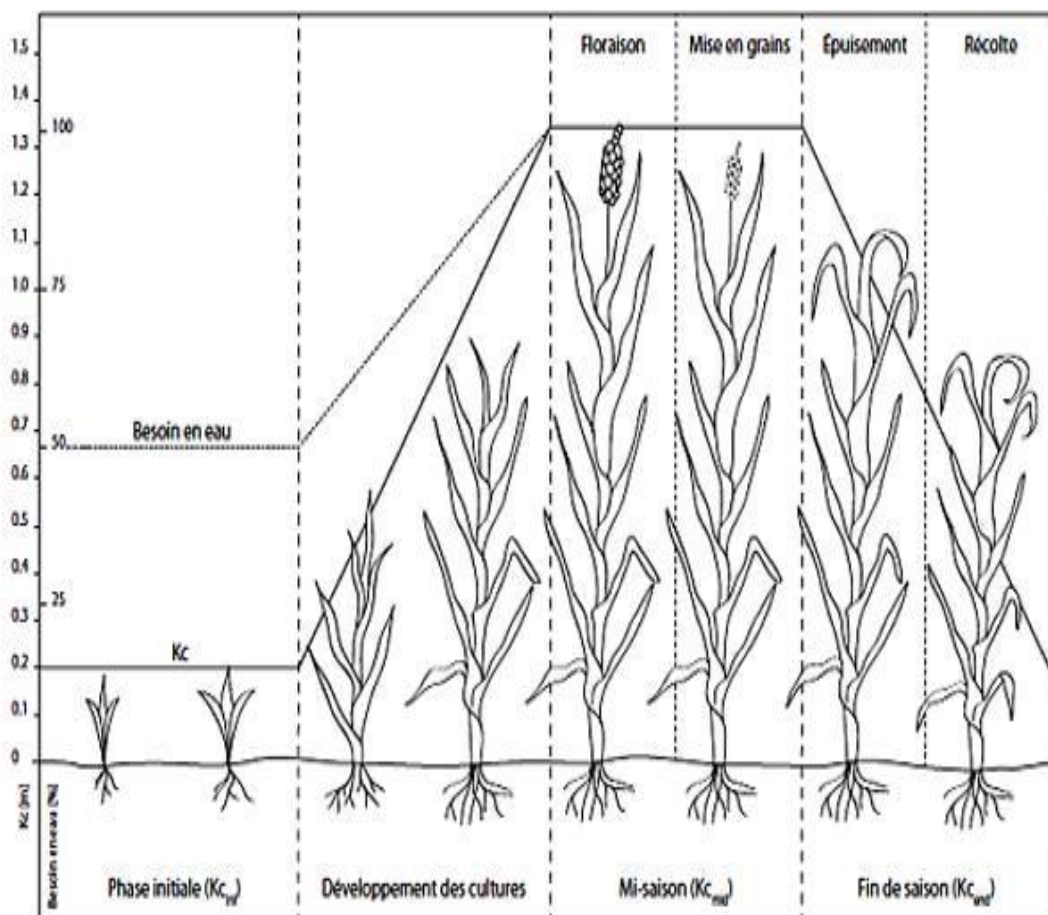


Figure 2 : Courbe de coefficients culturaux et définition des phases (Doorenbos et Pruitt, 1975)

Tableau I : Exemple de coefficients culturaux (cas du blé)

Stades	Initial	Développement	Mi-saison	Fin-saison	Récolte
K_c	0.3 à 0.4	0.7 à 0.8	1.05 à 1.2	0.65 à 0.75	0.2 à 0.75

B- Détermination des besoins en eaux des cultures : elle se fait selon deux méthodes

- *Méthode directe* : consiste à utiliser un évapotranspiromètre ou une case lysimétrique. Ce procédé se base sur le suivi du bilan hydrique au niveau d'une surface cultivée, délimitée dans le champ, mais isolée pour éviter les échanges hydriques avec le milieu environnant (sauf pour la partie supérieure), qui permet les échanges avec l'atmosphère.

Le bilan hydrique au niveau d'un lysimètre s'écrit comme suit:

$$\mathbf{B = \Sigma Apports - \Sigma Pertes}$$

$$\mathbf{P + I = Tr + Ev + Dr \pm \Delta s}$$

P : précipitation

I : irrigation

Tr : transpiration de la culture

Ev : évapotranspiration

Dr : drainage

Δs : variations du stock d'eau

- *Méthode indirecte* (formules empiriques) : Cette méthode se base sur l'utilisation des formules utilisant le bilan d'énergie ou des formules empiriques utilisant les données climatiques de la zone à irriguer (figure 3).

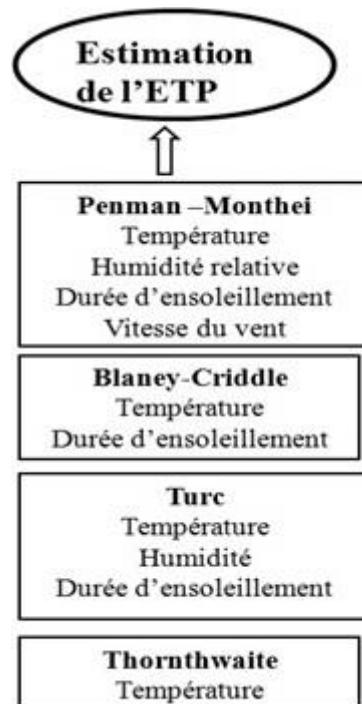


Figure 3 : Méthode indirecte pour le calcul de l'ETP (formules empiriques)

- *Méthodes informatiques :*

Les méthodes informatiques ou modèles sont dérivées des méthodes empiriques, ou elles se basent sur le bilan d'énergie. Ces formules sont programmées après simplification.

Dans la plupart des cas, les méthodes informatiques calculent non seulement les besoins en eau des cultures mais procèdent aussi à un calendrier d'irrigation en se basant sur :

- les besoins en eau de la culture
- la nature du sol
- les pluies efficaces.

Une bonne maîtrise de l'irrigation exige de l'agriculteur la connaissance des quantités d'eau à apporter aux cultures. Cette quantité peut se définir à différents niveaux des surfaces irriguées :

- **A l'intérieur de la parcelle**

- **A l'amont de la parcelle**

Dans ce cas, la quantité d'eau apportée à une culture est obtenue par la relation suivante :

$$V = Q \times T$$

V: Volume d'eau apporté (m³/ha)

Q : Débit (m³/h)

T : Temps d'arrosage (h)

Le compteur volumétrique est un compteur qui donne la quantité d'eau livrée à la culture (mètre cube) entre le début et la fin de l'irrigation .Cet appareil est généralement le plus utilisé. Il se trouve au niveau de la borne ou de la station de tête.

1.3. Détermination des quantités d'eau à apporter à la culture

La détermination des quantités d'eau à apporter à la culture à l'intérieur de la parcelle passent d'abord par la mesure de l'humidité du sol. Ceci est réalisé soit par prélèvement à l'aide d'une tarière, ou bien par des appareils de mesures de l'humidité du sol.

Il est important de connaître les propriétés physiques du sol, notamment la porosité, le pouvoir de rétention, la texture et la perméabilité (ces paramètres sont liés entre eux).

1.3.1. L'humidité du sol

L'humidité du sol est une donnée fondamentale pour le pilotage de l'irrigation. Il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'humidité du sol.

A- Le tensiomètre : il permet le contrôle de l'évolution de l'eau dans le sol (l'état hydrique du sol) (photo 1).

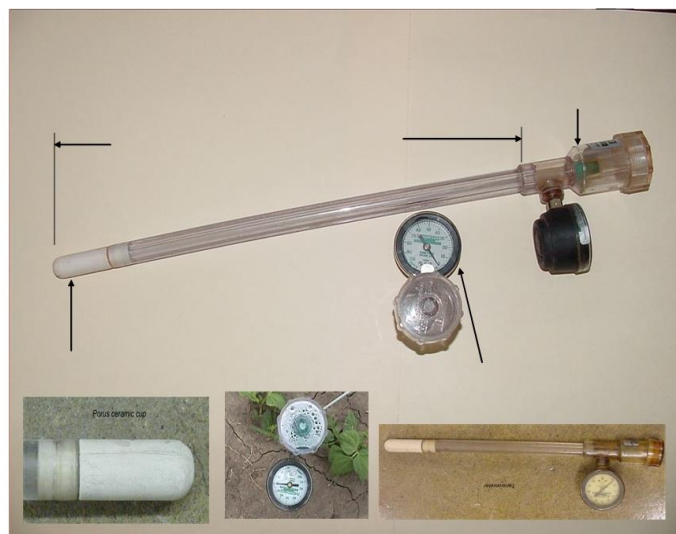


Photo 1 : Tensiomètre

Principe de fonctionnement : La bougie poreuse est placée dans le sol à la profondeur de mesure voulue. Cette bougie restitue de l'eau au sol lorsque celui-ci tend à se dessécher, dans ce cas le réservoir étant étanche, il se produit, par rapport à la pression atmosphérique ambiante, une dépression mesurée par le manomètre.

Cependant, si le sol est ré-humidifié, la dépression provoque un retour de l'eau dans le tensiomètre et le manomètre indique le nouveau équilibre obtenu.

Beaucoup d'eau = faible tension

Peu d'eau = forte tension

Nous appelons « tension » la valeur de la dépression lue sur le manomètre.

- **Avantages du tensiomètre**

- N'exigent qu'un minimum de manipulation,
- Permettent la réalisation de mesures en continu.

- **Intérêts du tensiomètre**

- Meilleur outil pour détecter les excès d'eau (insuffisance de drainage, apports d'eau trop abondants).
- Il est utilisé pour l'irrigation automatisé.
- Permet d'apprécier l'opportunité de commencer les arrosages et de renouveler les arrosages, en contrôlant que l'apport précédent a été totalement épuisé.
- Renseigne sur le devenir de l'eau d'irrigation dans le sol
 - ✓ Aspersion : profondeur atteinte par une dose d'arrosage ;
 - ✓ Gravitaire : profondeur atteinte, diffusion latérale de l'eau et homogénéité de sa répartition le long des raies ;
 - ✓ Goutte à goutte : diffusion de l'eau (permet l'ajustement de la fréquence et de la dose pour maintenir un volume humidifié constant).

B-Détermination du taux d'humidité

La méthode gravimétrique consiste à faire un prélèvement d'échantillons de sol de la parcelle à étudier par la méthode de la double pesée. Ainsi, l'humidité pondérale (H_p) du sol serait égale : $H_p = [(P_h - P_s)/P_s] \times 100$

Hp = humidité pondérale (% d'eau/au poids de sol sec)

Ph = poids humide du sol (g)

Ps = poids sec du sol (g)

Exemple de calcul

A titre d'exemple, les caractéristiques du sol avant irrigation (**Av-Ir**)

- poids humide (Ph) = 213 g

- poids sec (Ps) = 185g

$$Hp = [(213-185)/185] \times 100$$

$$Hp = 15\%$$

Les caractéristiques du sol après irrigation (**Ap-Ir**)

- poids humide (Ph) = 226 g

- poids sec (Ps) = 185 g

Le pourcentage d'humidité pondérale $Hp = [(226-185)/185] \times 100$

$Hp = 22\%$, soit 220 g d'eau par kg de sol sec.

- La variation de stock d'eau Δs exprimée en % par rapport au sol sec (Δsp)

$$\Delta sp = (Av-Ir) - (Ap-Ir) = 22\% - 15\% = 7\%, \text{ soit } 70 \text{ g d'eau par kg de sol sec}$$

Si la densité apparente (da) est égale à 1,5, la variation de stock par rapport au volume de sol est égale à $\Delta sv = \Delta sp \times da$.

Δsv : variation du stock d'eau volumique

Δsp : variation du stock d'eau pondérale

$$\Delta sv = \Delta sp \times 1,5$$

$\Delta sv = 10,5\%$, soit 0.105 m³ d'eau par m³ de sol.

- La variation de stock Δs exprimée en lame d'eau ou hauteur d'eau (mm) (Δsh)

$$\Delta sh = (\Delta sv \times h)/100$$

Si la profondeur humidifiée est égale à 60 cm, la variation de stock exprimée en hauteur d'eau est égale à: $\Delta sh = \Delta sv \times h$

$$\Delta sh = (10,5 \times 600)/100 = 63 \text{ mm}$$

- **La variation de stock Δs exprimée en volume d'eau par ha (m^3 d'eau par ha) (ΔsV)**

$$\Delta sV = (\Delta sh \times 10) = 630 \text{ m}^3/\text{ha}$$

1.3.2. La texture du sol

La distribution granulométrique est l'une des caractéristiques les plus importantes du sol. Elle a un effet sur les propriétés du sol telles que la conductivité capillaire d'un sol, l'humidité disponible, la perméabilité d'un sol, etc.

En outre, la texture du sol joue un rôle central dans le contrôle du drainage, de la redistribution de l'eau et de l'aération du sol, des facteurs essentiels à la productivité agricole (Dewangan et al., 2023). La texture du sol a un effet sur la rétention en eau et le potentiel hydrique, comme illustré par la figure 4.

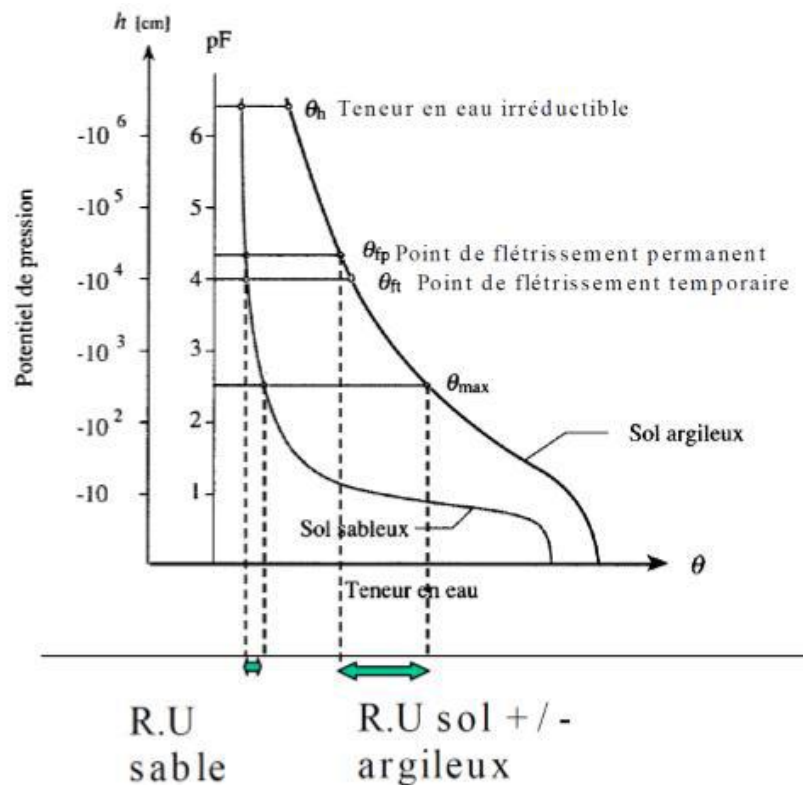


Figure 4 : Effet de la texture du sol sur la teneur en eau du sol et le potentiel hydrique (Hénin, 1977).

1.3.3. La perméabilité hydraulique

C'est la propriété qui traduit en langage courant la plus ou moins grande facilité avec laquelle l'eau s'infiltré dans le sol. Ce paramètre pédologique permet de calculer le temps d'irrigation.

Il faut noter de l'existence d'une différence entre la perméabilité et la conductivité hydraulique.

La conductivité hydraulique se définit par la capacité d'un sol à conduire l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique. La conductivité hydraulique (K) dépend des caractéristiques du milieu porale et celles du liquide de percolation. En effet, Il est possible, en théorie comme en pratique, de séparer K en deux facteurs à savoir la perméabilité intrinsèque du sol (k) et la fluidité du liquide de percolation (f) comme le montre la formule suivante (Hillel, 2004) : $K = k \times f$.

K : la conductivité hydraulique (cm/h)

k : la perméabilité intrinsèque (cm²)

f : la fluidité du liquide de percolation qui est directement liée à la densité du liquide ρ (g/cm³), et qui est inversement liée à la viscosité dynamique η (g/cm.s) comme le montre la formule suivante : $f = g \times \rho / \mu$ il est à noter que g est la constante de gravité (9,81 m/s²). Quant à la perméabilité

intrinsèque du sol, elle est liée à la géométrie de l'espace porale et en particulier à la distribution de la taille des pores, à la tortuosité (Hillel, 2004), et à la connectivité entre les pores (Bouma, 1991 ; Radcliffe et Rasmussen, 2002).

Il existe plusieurs méthodes permettant la mesure de la perméabilité des sols, nous pouvons citer à titre d'exemple la méthode de Muntz et le dispositif de McNeal et Reeve (1964). Ces méthodes de mesure se basent sur la loi de Darcy.

Par ailleurs, la conductivité hydraulique est l'un des facteurs les plus pertinents qui contrôlent la profondeur de la nappe phréatique dans les terres agricoles drainées en profondeur. La procédure de dimensionnement actuelle consiste à calculer l'espacement latéral des drains en utilisant une moyenne des mesures de conductivité hydraulique effectuées dans la zone à drainer (Skaggs et al., 2012).

1.3.4. La porosité

C'est le volume des vides remplis d'eau ou d'air, exprimé en (%). La porosité détermine la capacité du sol à stocker de l'eau au moyen des micropores et à la drainer par les macropores. Elle influence la conductivité hydraulique, l'infiltration et la capacité à maintenir l'humidité utile pour les plantes (capacité au champ, point de flétrissement).

Une porosité adéquate permet une meilleure pénétration racinaire, permet également une bonne absorption de l'eau et des nutriments, et offre un habitat favorable aux micro-organismes actifs dans le sol (Reynolds, 2002). La porosité crée un environnement favorable à la biodiversité microbienne et au déploiement des nutriments, favorisant la dégradation de la matière organique ainsi que la fertilité du sol (Tochukwu, 2024).

Porosité totale (PT) = $100 \times \left(1 - \left(\frac{Da}{Dr}\right)\right)$ (stockage de l'eau), avec Da : densité apparente et Dr : densité réelle.

1.4. Les paramètres de l'irrigation

Les bonnes pratiques d'irrigation reposent sur le calcul d'un certain nombre de paramètres, en occurrence la dose, la fréquence et la durée de l'irrigation.

1.4.1. La dose d'irrigation

La dose d'irrigation est la quantité d'eau nécessaire pour ramener l'humidité de la couche du sol asséchée par les plantes à la capacité au champ. La dose d'irrigation doit correspondre à la réserve facilement utilisable RFU. Elle s'exprime par la formule suivante :

$Dose = RFU = (H_{cc} - H_{Pf}) \times Da \times Z \times \alpha$, avec α qui est le coefficient de la réserve utile de l'eau du sol qu'on laisse s'épuiser avant de déclencher l'irrigation. Ce coefficient dépend de la texture du sol.

RFU : réserve facilement utilisable.

Hcc : l'humidité à la capacité au champ ou capacité de rétention.

HPf : l'humidité au point de flétrissement permanent.

Da : densité apparente du sol.

Z : profondeur racinaire (profondeur du sol à irriguer).

Exemple

$H_{cc} = 34\%$, $H_{Pf} = 23\%$, $da = 1.4$, $Z = 600 \text{ mm}$, $\alpha = 2/3$

Dose d'irrigation = $(0.34 - 0.23) \times 1.4 \times 600 \times (2/3) = 61.6 \text{ mm}$

Dose d'irrigation = 61.6 mm

1.4.2. Fréquence d'irrigation

La fréquence mensuelle d'irrigation (N) : c'est le nombre d'arrosages qu'il faut pour combler le déficit agricole (Da) mensuel. Elle se calcule par la relation suivante : $N = (\text{besoins mensuels} / \text{Dose})$.

Exemple

ETM = 140 mm/mois (mois d'août), Dose d'irrigation = 61.6 mm

$N = 140 / 61.6 = 2.27$

$N = 2.27$, donc il faut irriguer 2 fois par mois.

1.4.3. Le tour d'eau

C'est le nombre de jours qui séparent 2 irrigations successives.

Le tour d'eau (T) = (Dose d'irrigation / ETMj) avec ETMj : évapotranspiration maximale journalière.

Exemple

$$ETMj = 140/31 = 4.51 \text{ mm/jour}$$

$T = 61.6/4.51 = 13.65$, le nombre de jours qui s'éparent deux irrigations successives est de 13 jours et demi.

1.4.4. Durée de l'irrigation

La durée de l'irrigation (DI) renseigne sur le temps que doit durer une irrigation. Elle dépend de la perméabilité du sol et de la dose choisie.

$$DI = \text{Dose d'irrigation} / \text{Perméabilité}$$

Exemple

Dose d'irrigation = 61.6 mm, perméabilité = 2.66 cm/h

$$DI = 61.6/2.66 = 2.31 \text{ h}$$

2. LE DEBIT CARACTERISTIQUE

2.1. Variation des besoins journaliers

Nous calculons le débit constant adéquat pour une durée de six mois. En se basant sur la quantité d'eau d'appoint nécessaire pour une culture par hectare, pour six mois de végétation active. Le débit ainsi calculé, appelé le débit fictif continu (Qfc) moyen. Ce dernier n'a qu'un intérêt purement théorique :

$$Qfc = \frac{\text{besoins journaliers}}{86400} \text{ (l/s/ha)}$$

Les besoins en eau d'appoint journaliers ou mensuels de chaque culture ne sont pas également répartis (figure 5 ; tableau II).

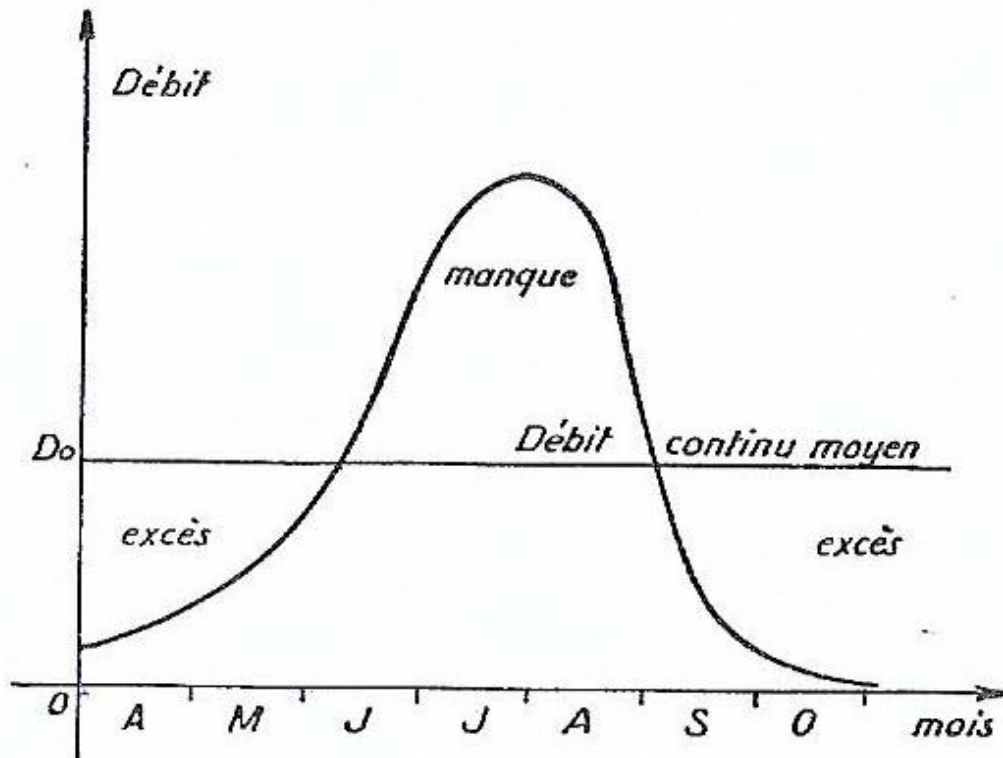


Figure 5 : Variation des besoins journaliers des plantes (Ollier et Poirée, 1981)

Tableau II : Besoins journaliers (mm) en eau d'appoint (régions tempérées)

Mois	A	M	J	J	A	S
Blé (mm)	0.5	1.5	4	3		
Luzerne (mm)		2	5	4		

(Ollier et Poirée, 1981)

Les valeurs maximales ou besoins maximaux journaliers (offrent le plus d'intérêt) correspondent aux mois les plus secs. A titre d'exemple, il s'agit du mois de juin (Tableau II) pour le blé et la luzerne. Ceci est important pour les ouvrages d'irrigation en rapport avec les débits nécessités par les besoins de la période de pointe.

2.2. Détermination du débit caractéristique

Le débit caractéristique (appelé coefficient caractéristique d'arrosage) correspond au débit fictif continu au moment de la période sèche (débit maximal) (tableau III).

Tableau III : Besoins journaliers (m³/ha) en eau d'appoint (régions tempérées)

Mois	A	M	J	J	A	S
Blé (m ³ /ha)	5	15	40	30		
Qfc (l/s/ha)	0.05	0.17	0.46	0.34		
Luzerne (m ³ /ha)		20	50	40		
Qfc (l/s/ha)		0.23	0.57	0.46		

Par exemple, lors du mois considéré, 50 mm de pluie sont tombés, cela correspond à un débit caractéristique de 0,19 l/s/ha. Il faudra donc diminuer le débit caractéristique trouvé.

3. LES SYSTEMES D'IRRIGATION

Les systèmes d'irrigation peuvent être classés en deux grandes catégories, l'irrigation gravitaire et l'irrigation sous pression. Cependant, dans la pratique, nous distinguons l'irrigation gravitaire, l'irrigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion.

Les principaux systèmes d'irrigation sont présentés dans la figure 6.

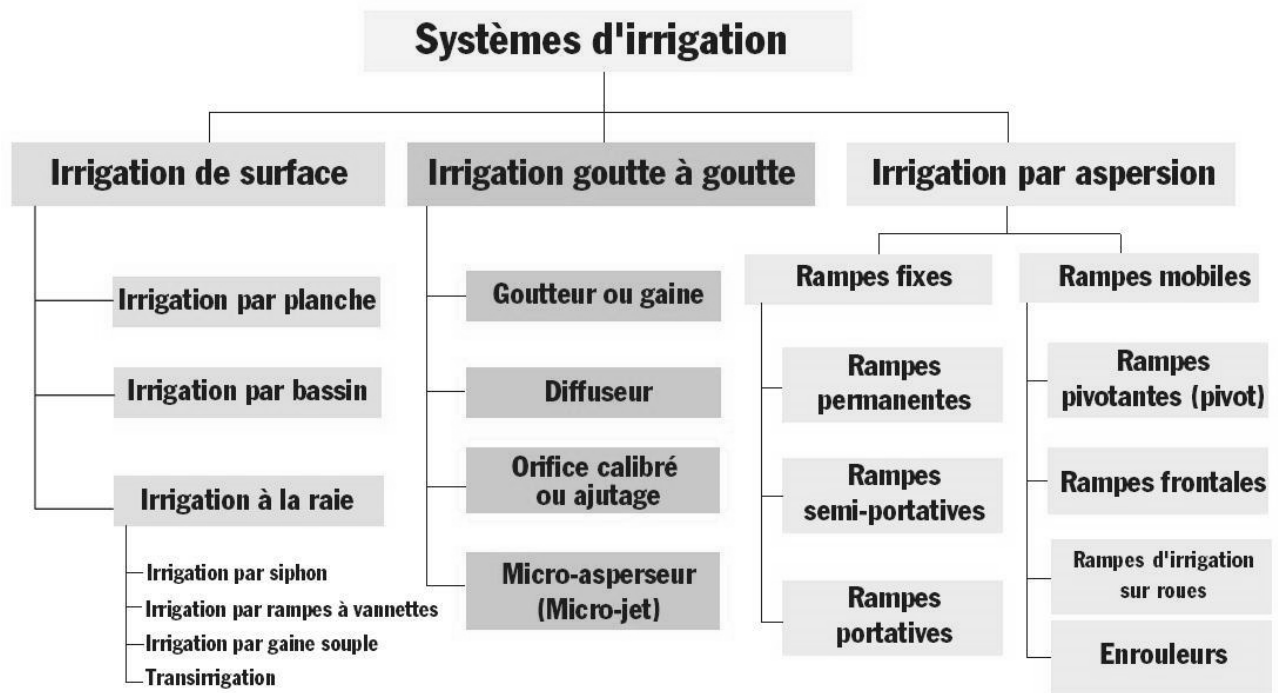


Figure 6 : Les principaux systèmes d'irrigation (Hamdan & Amir, 2020)

3.1 Les systèmes d'irrigation de surface

Les systèmes d'irrigation de surface sont classés dans l'ordre croissant de leur efficacité :

Irrigation par ruissellement > irrigation par planches > irrigation à la raie > irrigation par bassins.

Pour l'irrigation à la raie, les raies dont la taille varie, peuvent être placées dans le sens de la pente ou selon les courbes de niveau (Photo 2). De petits sillons peu profonds, appelés corrugations, sont typiquement utilisés pour les cultures denses telles que les céréales basses et la luzerne. Les raies plus larges et plus profondes conviennent pour les cultures en ligne comme le maïs. L'irrigation à la raie ne couvre qu'un cinquième ou la moitié de la surface.

A- Avantages

- Le débit unitaire est considérablement réduit et cette technique peut être pratiquée avec des pentes allant jusqu'à 12%, si les raies sont placées selon les courbes de niveau.
- Diminution des pertes par évaporation (la surface mouillée plus petite).

B- Inconvénients

- Elle n'est pas toujours efficace et un ruissellement important peut se produire si un débit d'entrée constant est maintenu pendant l'arrosage.



Photo 2 : Irrigation à la raie (Boucher, 2007)

3.2 La micro-irrigation

La micro-irrigation, encore appelée l'irrigation goutte à goutte, consiste à délivrer l'eau en gouttes à la surface du sol avec un faible débit (2-20 litres par heure). L'eau est canalisée dans des tuyaux en plastique munis d'orifices appelés goutteurs (émetteurs, distributeurs, jets d'eau, etc.) (photo 3). L'eau est délivrée au voisinage immédiat de la plante de sorte que l'humidification soit limitée à la zone racinaire du sol.

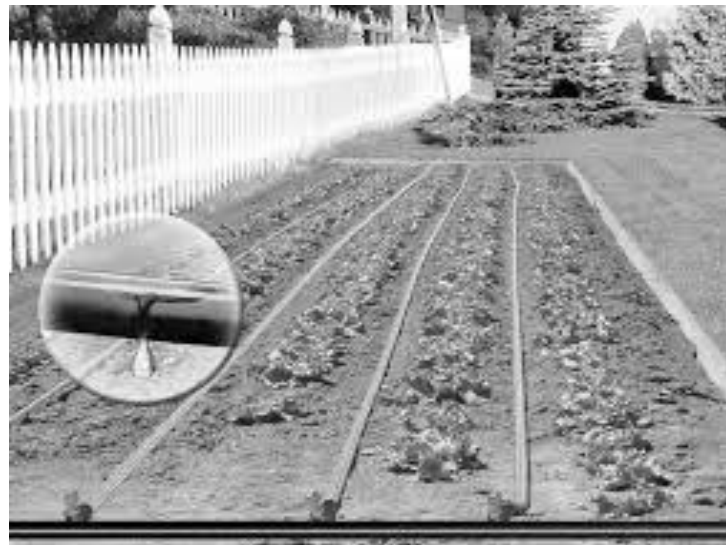


Photo 3 : La micro-irrigation (goutte à goutte)

a) Avantages

- Les systèmes goutte à goutte apporte l'eau directement sur ou dans le sol et n'humectent qu'une partie seulement du sol.
- L'eau est apportée directement ou juste à côté de la zone racinaire des plantes minimisant ainsi les pertes par percolation.
- Ils réduisent l'utilisation de l'eau par les mauvaises herbes et fonctionnent à très faible pression.
- Elles arrosent selon une fréquence élevée créant ainsi dans le sol des conditions d'humidité optimales pour la plante.

b) Inconvénients

- Coûts initiaux élevés et risques de colmatage du système, tout particulièrement les distributeurs.

L'irrigation goutte à goutte souterraine est une forme de l'irrigation localisée qui distribuent l'eau aux plantes directement au niveau des racines. Elle consiste à placer les conduites sous la surface du sol, à une profondeur qui dépend de la nature du sol et du développement du système racinaire de la plante (FAO, 2002).

3.3. L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion consiste à fournir l'eau nécessaire aux cultures sous une forme analogue à la pluie naturelle (photo 4). L'eau est mise sous pression, généralement par pompage, pour être ensuite distribuée au moyen d'un réseau de canalisations. La distribution d'eau est faite au moyen de rampes d'arrosage équipées d'asperseurs. L'eau sort sous la forme d'un jet et se répartit en gouttelettes d'eau qui tombent sur le sol.

L'irrigation par aspersion est un moyen polyvalent pour arroser n'importe quels types de cultures, de sols et de topographies (Schwab, 1993).



Photo 4 : Irrigation par aspersion

a) Avantages

- Efficacité élevée.
- Elle peut être efficace dans des conditions de sols ou de topographies pour lesquelles les méthodes d'irrigation de surface ne le sont pas.
- Sols à faible profondeur, ne pouvant être correctement nivelés pour une irrigation de surface, tout en conservant une profondeur suffisante.
- Sols trop perméables, qui ne permettent pas une répartition uniforme de l'eau dans le cadre d'une irrigation avec ruissellement en surface.

b) Inconvénients

- Coûts d'investissement élevé.
- Elle est à écarter dans les régions très régulièrement ventées.
- Elle favorise l'évaporation, qui est d'autant plus intense lorsque les gouttelettes sont fines.

3.4. L'irrigation gravitaire

L'irrigation par planche consiste à faire couler une mince couche d'eau sur un sol incliné de 0,2 à 3%. Le débit à déverser est en fonction de la pente, de la largeur et de la longueur de la planche. Cette méthode est de loin la plus difficile car il faut ajuster le débit d'irrigation de chaque planche avec toutes les autres variables. Une des formules pratiques qui consiste à déterminer la longueur de la planche qui dépend de l'infiltration du sol, ce qui correspondrait au temps de ruissellement. Autrement dit, l'aiguadier ouvre la vanne et attend que l'eau arrive au bas de la planche, et à ce moment-là il ferme la vanne d'arrivée.

3.5. L'irrigation par bassin

Ce système est le plus connue dans l'irrigation gravitaire. Sa pratique est réalisable sur un sol nivelé (pente 0,1 à 1%) ainsi que la simplicité de l'opération, qui consiste à remplir le bassin. De ce fait, cette technique est fréquemment utilisée dans plusieurs régions. La surface des bassins est de 40 à 50 m², cette technique est connue sous le nom "Robta". Cette dernière occasionne une perte importante de superficie, due au nombre important de cloisonnements.

3.6. L'irrigation à la raie ou par rigole

Ce système d'irrigation convient parfaitement aux sols présentant une pente comprise entre 0,2 et 3%. Les sillons sont séparés par une distance variant entre 0,6 et 1,25 m, selon le type de sol et la culture. Suivant le débit dont on dispose, on peut irriguer un ou plusieurs sillons à la fois. Les raies peuvent être parallèles ou perpendiculaires à la rigole permanente d'amenée d'eau.

D'une manière générale, l'irrigation est réalisée suivant un débit unique ou suivant une succession de deux débits différents, un premier débit important qui est appelé débit d'attaque et un deuxième débit plus faible qui est appelé débit d'entretien.

3.7. Efficience de l'irrigation

L'efficience de l'irrigation est définie par le rapport des volumes d'eau effectivement utilisés par les plantes aux volumes délivrés en trotte de réseau (Soutter et al., 2007). La notion d'efficience d'un réseau d'irrigation exprime la qualité de la gestion de la ressource hydrique. Des pertes en eau peuvent en effet se produire tant au niveau de la distribution à la parcelle que dans le réseau d'amenée.

Pour l'irrigation gravitaire, l'efficience est d'autant plus faible que les sols sont perméables, avec des valeurs indicatives se situant généralement entre 40% sols sableux, 60 à 70% sols argileux (FAO,1989).

Il existe plusieurs termes pour décrire l'efficience des performances d'un système d'irrigation. L'efficience au champ ou lors des apports est définie par :

$$Ef = 100 \times \left(\frac{W_s}{W_d} \right)$$

- **Ef** : Efficience.
- **W_s** : eau stockée dans le sol au niveau de la zone racinaire lors de l'irrigation.
- **W_d** : eau apportée sur le champ lors de l'irrigation.

Exemple de calcul

$$W_s = 380 \text{ m}^3 ; W_d = 450 \text{ m}^3$$

$$E_f = (380/450) \times 100 = 84.44\%$$

$$E_f = 84.44\%$$

3.8. La performance de l'irrigation

La performance de l'irrigation est une notion relative consistant à atteindre des objectifs donnés, en disposant de ressources hydriques limitées dans un environnement soumis à des changements (Hanafi, 2011).

Selon Tiercelin et Vid (2006), deux principaux critères de performances en irrigation peuvent être étudiés à partir des observations aux champs :

- L'uniformité de distribution aussi dite uniformité d'arrosage qui est définie par le rapport entre la hauteur d'eau infiltrée moyenne sur le quart de la surface le moins arrosé et la hauteur d'eau moyenne infiltrée sur l'ensemble du champ.

- L'efficacité d'application qui est définie comme le rapport entre la hauteur d'eau moyenne apportée dans l'épaisseur de sol explorée par les racines et la hauteur d'eau moyenne appliquée au champ ou dose d'arrosage.

L'uniformité de distribution dépend surtout des paramètres caractéristiques du système d'irrigation. En revanche, l'efficacité d'application est généralement influencée par la décision prise en termes de pilotage de l'irrigation (Hanafi, 2011).

3.9. L'irrigation souterraine

L'irrigation souterraine peut être définie comme l'action de fournir l'eau aux plantes en dessous de la surface du sol, en maintenant une nappe d'eau artificiellement élevée, de façon à maintenir la meilleure combinaison d'eau et d'air dans la zone des racines pour des rendements maximaux. L'irrigation souterraine peut se faire à l'aide de tuyaux perforés enterrés ou de canaux ouverts (Mailhol et al., 2009).

3.9.1. Techniques d'irrigation souterraine

Il y a différentes techniques d'irrigation souterraine, nous pouvons citer les techniques suivantes :

- L'irrigation par pot en argile enterré
- L'irrigation par mèche
- L'irrigation par tuyau en profondeur
- L'irrigation par tuyaux poreux
- L'irrigation par contrôle des nappes phréatiques.

L'irrigation souterraine est une méthode d'irrigation plus efficace dont l'eau alimente sous la surface du sol directement la zone racinaire des plantes, en éliminant les pertes d'eau par évaporation et réduit le développement des mauvaises herbes et les maladies. L'irrigation souterraine est rarement utilisée en Algérie, en raison des coûts d'investissement qui sont très élevés.

4. MINI PROJET D'IRRIGATION - EXEMPLE DE CALCUL

Soit un projet d'irrigation d'une exploitation composée d'une parcelle occupée par une céréale d'été (le sorgho).

a) **Données pédologiques** : la parcelle a les caractéristiques suivantes :

- L'humidité à la capacité de rétention ($H_p cr$) = 14%
- L'humidité au point de flétrissement permanent ($H_p pF$) = 8%
- Densité apparente (D_a) = 1.6

b) **Données climatiques**

- ETP du mois de pointe = 180 mm

c) **Données relatives à la plante**

- Profondeur racinaire (P_r) = 0.6 m
- Le coefficient cultural (K_c) = 0.8

d) **Données relative aux ressources hydriques**

- L'exploitation dispose d'un puits qui débite au maximum = 2l/s ($Q_{max} = 2l/s$)

Calculez :

1. La réserve facilement utilisable
 2. Quand faut-il irriguer ?
 3. Combien faut-il apporter d'eau à chaque irrigation ? (la dose d'irrigation) ?
 4. Combien faut-il irriguer durant le mois de pointe (juillet) ? (la fréquence d'arrosage) ?
 5. Le tour d'eau.
5. Si l'agriculteur dispose d'un puits, quel est le débit qu'il doit fournir pour irriguer les 2 ha. Nous considérons que les pertes totales du réseau sont de 75%.

- Calcul de la réserve utile pondérale (RU_p)

$$RU_p = (H_p \text{ cr} - H_p \text{ pf}) \times Pr$$

$$RU_p = (0.14 - 0.08) \times 600$$

$$RU_p = 36 \text{ mm}$$

- Calcul de la réserve utile volumique (RU_v)

$$RU_v = H_p \text{ cr} - H_p \text{ pf}) \times Pr \times da$$

$$RU_v = (0.14 - 0.08) \times 600 \times 1.6$$

$$RU_v = 57.6 \text{ mm}$$

Le calcul de la RU étant en mm, il est nécessaire de la calculer en mm d'eau dans le sol, soit une hauteur h (mm). Il est donc nécessaire d'exprimer l'humidité pondérale ou volumique en % ou bien en hauteur d'eau (mm).

- Calcul de la RFU

$RFU = \alpha \times RU_v$, pour le cas de notre sol $\alpha = 2/3$, α : dépend de la texture du sol.

$$\text{RFU} = 2/3 \times 57.6$$

RFU = 38.4 mm, il faudra irriguer lorsque le sol aura perdu 38.4 mm, soit 38.4 l/m² ou bien 384 m³/ha.

- Calcul du nombre d'irrigation (fréquence d'irrigation)

Il faut calculer d'abord l'ETM, $\text{ETM} = K_c \times \text{ETP}$

$$\text{ETM} = 0.8 \times 180 = 144 \text{ mm/mois}$$

$$\text{ETM} = 144 \text{ mm/mois soit } 144/31 = 4.65 \text{ mm/jour.}$$

Le nombre d'irrigation (fréquence) = Besoins mensuels (ETM) /Dose d'irrigation (RFU).

La fréquence d'irrigation = $144/38.4 = 3.75$, donc il faut irriguer 4 fois/mois.

- Calcul du tour d'eau (T)

T = dose d'irrigation (RFU)/le besoins journalier ETMj.

$$T = 38.4/4.65 = 8.25 \text{ jours, soit 8 jours.}$$

- Calcul des besoins en eau de l'exploitation

Il faut calculer le débit fictif continu (Q_{fc}). **Q_{fc} = besoins journaliers/86400**

Si l'efficiencia du réseau est de 75%, le nouveau débit fictif continu corrigé doit être le suivant : $Q_{fc} = [(46.5 \times 1000)/86400]/0.75 = 0.72 \text{ l/s.}$

Besoins en eau de l'exploitation = Besoin/ha × le nombre d'ha.

Le débit fictif continu (Q_{fc}) étant de 0.72 l/s pour 1 ha.

Pour 2 ha, le besoin total serait de $0.72 \times \text{le nombre d'ha (2 ha)}$, $0.72 \times 2 = 1.44 \text{ l/s}$ pour les 2 ha. Soit 124 m³/jour.

-Détermination du temps de pompage par jour

Le débit du puits étant de 2l/s, soit 7.2 m³/h, le besoin journalier de l'exploitation étant de 124 m³, le temps de pompage par jour sera : besoin de l'exploitation par jour/débit du puits.

$93/5.4 = 17.22$ h, soit 17h et 13mn.

CHAPITRE II : QUALITE DES EAUX D'IRRIGATION ET IRRIGATION EN MILIEU SALE

INTRODUCTION

À l'échelle mondiale, environ 900 millions d'hectares des terres, dans plus de 100 pays, qui sont affectés par la salinisation et la sodicité (Jisheng et al., 2021). Toutefois, il a été estimé que 23% des terres cultivées dans le monde sont salines et 37% sont sodiques (Shahid and Al-Shankiti, 2013). Près de la moitié des sols affectés par le sel dans le monde sont sodiques (Huang et al., 2011). Nous constatons que les statistiques différentes d'une étude à une autre. Globalement, il ressort que la salinité est souvent liée à la sodicité des terres agricoles.

En Algérie, les périmètres irrigués souffrent de la salinisation des sols. Ceci est très visible dans les régions arides et semi-arides du pays à cause de l'irrigation non contrôlée, la mauvaise qualité de l'eau d'irrigation et par l'absence du drainage.

La superficie de terres salées en Algérie est estimée à un million d'hectares environ (Chaabane et Benreda, 1997). De même, 4 % de la surface agricole utile (S.A.U.) sont affectées par la salinité secondaire qui est en constante augmentation (M.A.P, 1998).

La salinisation est définie comme étant le processus pédologique suivant lequel le sol s'enrichit anormalement en sels solubles, acquérant ainsi le caractère salin. La salinité est un état qui résulte de l'accumulation des sels solubles dans le sol (Aubert, 1976). La salinisation es sols peut avoir une origine primaire ou une origine secondaire.

1. LES PRINCIPAUX SELS SOLUBLES

Les sels solubles sont les sels dont la solubilité est supérieure à celle du gypse, soit à 2g/l à 20°C (USSS, 1954).

Les principaux sels répandus dans les sols sont les suivants :

- Les Chlorures

Le chlorure est un sel principal responsable de la formation des sols salés. Il y a une solubilité très élevée et une forte toxicité pour les végétaux. Parmi ces sels nous avons :

- Chlorure de sodium (NaCl)
 - Chlorure de potassium (KCl)
 - Chlorure de calcium (Ca Cl₂)
 - Chlorure de magnésium (MgCl₂)
- **Les sulfates**
- Sulfate de Magnésium (Mg SO₄)
 - Sulfate de Sodium (Na₂ SO₄)
 - Sulfates de Potassium (K₂ SO₄)
- **Les carbonates**
- carbonate de magnésium (Mg CO₃)
 - carbonate de sodium (Na CO₃)
 - carbonate de potassium (K₂ CO₃)

2. SALINISATION EN ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES

La salinisation et la sodisation secondaires des sols constituent aujourd'hui des enjeux environnementaux majeurs, en particulier dans les zones arides, où elles figurent parmi les principales causes de dégradation des terres. Ces phénomènes ont des répercussions directes sur la productivité agricole et compromettent la sécurité alimentaire. Dès les années 1990, environ 20 % des terres irriguées à l'échelle mondiale étaient touchées par la salinisation, avec des proportions encore plus élevées en Égypte (33 %) et en Iran (29 %) (Ghassemi et al., 1995). L'Inde et la Chine comptaient alors les plus vastes superficies de terres irriguées affectées, respectivement 7 et 6,7 millions d'hectares, ce qui représentait 17 % et 15 % de leurs terres cultivées.

Cependant, au cours des trois dernières décennies, le phénomène de salinisation s'est intensifié à l'échelle mondiale. Ivushkin et al. (2019), à travers une cartographie par télédétection, ont montré que la superficie des terres salines est passée de 915,5 millions d'hectares en 1986 à 1 069,3 millions en 2016. D'autres recherches confirment cette tendance, estimant que 33 % des terres irriguées et 20 % des terres agricoles mondiales sont affectées par la salinité (Shrivastava & Rajesh, 2015). À l'horizon 2050, près de la moitié des surfaces agricoles pourraient être touchées à des degrés divers (Jamil et al., 2011), avec une progression parallèle des sols sodiques (Laoufi, 2025).

Par ailleurs, la dégradation des sols induite par la salinité ou la sodicité représente ainsi une contrainte environnementale majeure, particulièrement en zones arides et semi-arides, où elle compromet sérieusement la durabilité des systèmes de production agricole (Pitman & Läuchli, 2002).

3. Impact du climat sur la salinisation et la sodisation

Contrairement aux zones à climat humide, où les cations et anions sont généralement lessivés vers les couches profondes du sol ou transportés vers des aquifères ou des terrains plus bas (Zinck & Metternicht, 2009), les régions arides, semi-arides et subhumides présentent des dynamiques pédogéochimiques très différentes. Dans ces milieux, les cations ont tendance à rester fixés sur le complexe d'échange du sol ou à précipiter sous forme de minéraux secondaires lorsque la solution du sol atteint la saturation d'un sel donné.

Les sels faiblement solubles comme le carbonate de calcium (CaCO_3), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou la magnésite (MgCO_3) précipitent facilement dans ces conditions climatiques. Ce processus de précipitation réduit la concentration de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) en solution, ce qui favorise l'accumulation relative de sodium (Na^+). Ce dernier remplace alors les cations divalents sur le complexe d'échange cationique, ce qui provoque une élévation du pourcentage de sodium échangeable (ESP) et mène progressivement à la sodisation des sols (Bui, 2017).

Par ailleurs, dans les environnements arides où l'évaporation excède largement les précipitations, des sels plus solubles que le gypse peuvent également précipiter. Il s'agit notamment des carbonates de sodium (tels que la trona, la nahcolite et la thermonatrite), des sulfates de sodium (comme la thenardite), des sulfates de magnésium (ex. epsomite), ainsi que du chlorure de potassium (sylvite), des chlorures de magnésium (bischofite) et du chlorure de sodium (halite). Ces composés, connus sous le nom de « sels solubles », définissent les minéraux diagnostiques caractéristiques des sols salins (IUSS WRB Working Group, 2014). L'évaporation joue également un rôle déterminant dans la concentration des sels dissous dans les eaux souterraines, notamment lorsque la nappe phréatique est peu profonde et que les précipitations sont insuffisantes pour entraîner un lessivage efficace des sels accumulés (Cary et al., 2015). Ce phénomène est particulièrement marqué dans les bassins endoréiques des régions arides et semi-arides (Herrera et al., 2016).

Dans ces bassins fermés, les eaux souterraines salées évoluent sous l'effet combiné de la dissolution et de la précipitation de minéraux solubles tels que la calcite, l'halite et le gypse, le long des trajectoires d'écoulement souterrain. Le processus d'évaporation transforme

progressivement l'eau liquide en vapeur, ce qui concentre les sels dissous et intensifie la salinité dans les zones centrales du bassin.

4. LES PROBLEMES ENGENDRES PAR LES SELS

La salinité est une contrainte majeure qui affecte la germination, la croissance et le rendement des cultures entre autres.

- Effet sur la germination : la plupart des plantes sont plus sensibles à la salinité durant leurs phases de germination et de levée (Maillard, 2001) ;
- Effets sur la nutrition minérale des végétaux : les effets nutritionnels de la salinité incluent les deux actions primaires du sel sur les plantes (la toxicité directe due à l'accumulation excessive des ions dans les tissus et un déséquilibre nutritionnel provoqué par l'excès de certains ions).
- Effet sur le rendement : la salinité entraîne une réduction dans le rendement. A titre d'exemple, pour la tomate, lorsque la CE dépasse 2.5 dS/m, la chute du rendement devient significative.

2.1. La tolérance des plantes à la salinité

La tolérance de la plante à la salinité est définie comme étant sa capacité à accumuler des ions pour ajuster sa pression osmotique interne par rapport au milieu extérieur sans préjudices. A partir d'un certain seuil qui dépasse la tolérance de la plante, celle-ci va dépenser de l'énergie à faire face au stress salin plutôt qu'à la production de sa biomasse.

Les différentes stratégies que la plante adopte face au stress salin est l'accumulation d'ions tels que le sodium et les chlorures dans la vacuole. Ceci lui permettra d'assurer une pression interne importante et minimiser la cytotoxicité (Blumwald et al., 2000).

Cependant, une pression élevée de la vacuole, pourrait provoquer une succion importante du cytosol. Dont la déshydratation nuirait au fonctionnement du métabolisme en désorganisant la structure des protéines. La plante lutte contre ce phénomène par la synthèse et l'accumulation d'osmoprotecteur, comme la proline qui est reconnue comme indicatrice du stress salin.

Exemple: Chez les céréales, l'effet dépressif du sel se manifeste à partir d'un seuil critique de concentration, caractéristique de l'espèce et de la variété (Cramer, 2002). Le blé dur est plus sensible à la salinité que le blé tendre et le stade germination-levée ne doit pas dépasser une CE de 4 dS/m à 25 °C.

2.2. Propriétés des sols

D'après la figure 7, on observe que l'instabilité de la structure, appréciée par le test d'Emerson, augmente avec la proportion de sodium sur le complexe adsorbant. L'augmentation est plus rapide et l'instabilité plus grande quand le sol n'est pas calcaire (moins de Ca^{++} sur le complexe).

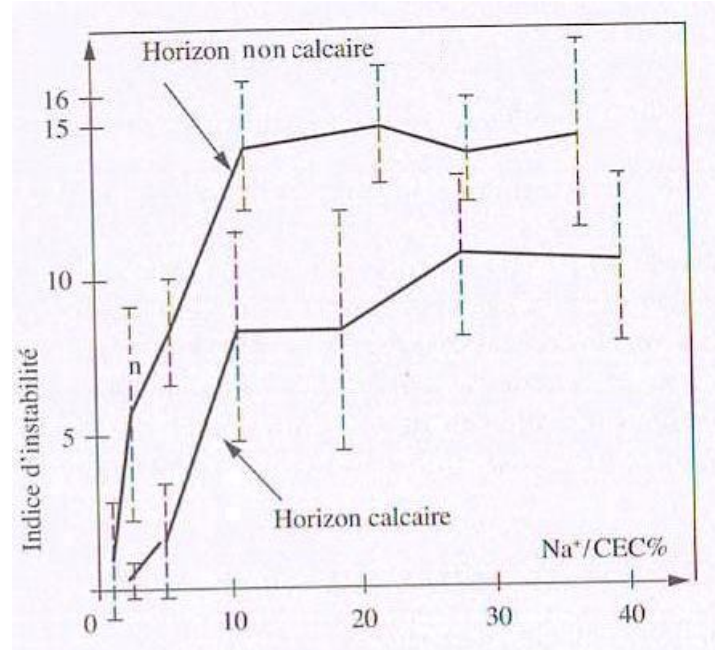


Figure 7 : Liaison entre dispersion et teneur relative du complexe adsorbant en sodium
(Pons et Gerbaud, 2005).

Pour la perméabilité, Servant (1970) a réalisé l'expérience simple et spectaculaire suivante :

- Il fait percoler une eau salée sur un échantillon d'une terre argileuse. La quantité d'eau qui filtre est constante par unité de temps et s'accroît donc linéairement avec le temps (figure 8). On note que la perméabilité est plus forte que si l'on emploie une eau distillée.
- Après une heure, l'eau salée est remplacée par l'eau distillée. L'échantillon s'imperméabilise aussitôt et l'eau ne passe pratiquement plus. La courbe devient subhorizontale (figure 8).

Les mécanismes impliqués sont les suivants :

- Rôle direct de la concentration saline : Plus la concentration saline est élevée, plus l'argile a tendance à flocculer (écrasement de la double couche diffuse). La perméabilité est donc plus grande qu'avec une eau non salée. Mais, dans

l'échantillon, cette percolation avec une eau saline a pour corollaire le remplacement des cations Ca^{++} et Mg^{++} par Na^+ .

2. Gonflement : Les argiles sodiques de type 2/1, même peu gonflantes, accroissent leur volume lorsqu'elles sont saturées par l'eau. Dans l'échantillon soumis, en deuxième lieu, à l'essai de percolation avec l'eau pure, il y a expansion généralisée des argiles sodiques et donc diminution de la porosité.
3. Dispersion et explosion osmotique : Dans l'échantillon, et au moment où on introduit l'eau pure, les agrégats sont riches en sel. Il y a osmose. L'eau pure pénètre rapidement ces agrégats et les fait exploser, ce qui détruit la porosité interstitielle résiduelle (Amezketta et al., 1995).

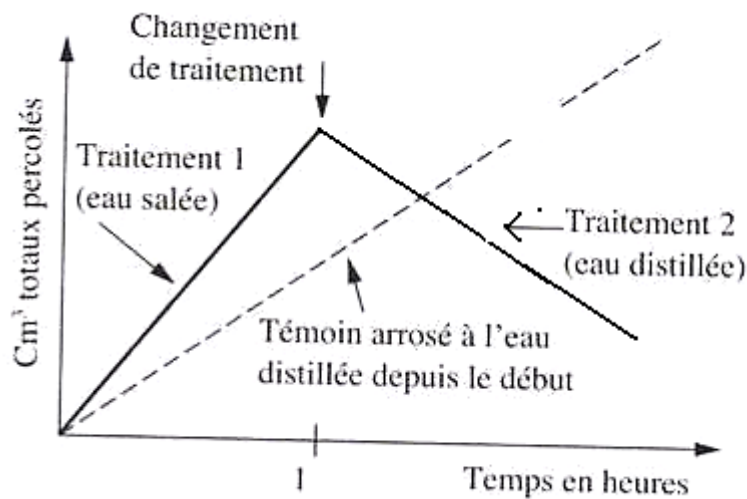


Figure 8 : Essais de percolation avec de l'eau salée puis de l'eau distillée (Servant, 1970).

2.3. La relation solution du sol - complexe adsorbant

Du fait de la présence de charges négatives à leur surface, les colloïdes adsorbent les ions chargés positivement tels que le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium. Les cations adsorbés neutralisent les charges négatives des colloïdes à travers une association électrostatique. Ces cations sont en partie remplacés ou échangés par les cations de la solution du sol. Chaque sol se caractérise par une capacité d'échange cationique et une garniture cationique qui lui sont spécifiques.

Le sodium, le calcium et le magnésium sont facilement échangeables, alors que cet échange est plus contraignant pour l'ammonium et le potassium à cause du phénomène de rétrogradation exercé par les argiles (USSL, 1954).

La solution des sols salés des régions arides se concentre par évaporation ou par absorption de l'eau par la plante induisant progressivement la précipitation des sels les moins solubles tels que le gypse, le carbonate de calcium et le carbonate de magnésium. Cette précipitation provoque une augmentation relative de la concentration du sodium dans cette solution.

Dans ces conditions, une partie du calcium et du magnésium échangeables est remplacée par le sodium au niveau du complexe adsorbant (U.S.S.L., 1954).

Les sites occupés par le sodium échangeable dans le complexe adsorbant sont exprimés par le pourcentage de sodium échangeable (ESP : Echangeable Sodium Pourcentage) (USSL, 1954).

$$ESP = (Na_e/CEC) \times 100$$

Na_e : sodium échangeable, CEC: capacité d'échange cationique.

La quantité du sodium fixée sur le complexe adsorbant est en équilibre avec la concentration du calcium, du magnésium et du sodium présent dans la solution du sol, cet état est exprimé par le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) (USSL, 1954).

$$S.A.R = \frac{Na}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}} \text{ Na, Ca et Mg: en meq/l}$$

Les risques liés à la sodicité sont exprimés par le SAR. Ce paramètre traduit la propriété qu'a cette eau de modifier la proportion des cations échangeables d'un sol, en particulier d'augmenter la proportion de sodium, quand elle est mise en contact prolongé avec le sol.

C'est par le SAR qu'il est possible d'évaluer les risques d'alcalinisation des sols.

La salinité peut être corrigée par le calcul d'une fraction de lessivage, qui permet la lixiviation des sels. En revanche, le traitement de la sodicité est très délicat et complexe. L'ESP dans le sol est plus stable que les concentrations en sels solubles. Par conséquent, le lessivage à lui seul ne peut abaisser l'ESP. Ce paramètre traduit une histoire de salinisation récurrente, il constitue donc un bon indice de dysfonctionnement du sol (Nijimbere, 2014).

3. CLASSIFICATIONS DES EAUX D'IRRIGATION

Plusieurs classifications ont été proposées pour classer les eaux par rapport à leur qualité, la plupart de ces classifications se basent sur le calcul de deux facteurs essentiels, à savoir :

- La salinité qui traduit la concentration totale en sels solubles dans l'eau d'irrigation. La réponse de la majorité des plantes à la salinité est évaluée par la salinité globale plutôt que par l'action spécifique de chaque ion (USSSL, 1954).

- Le SAR est calculé par la formule de Gapon.

Les carbonates et les bicarbonates ainsi que les éléments toxiques peuvent également jouer un rôle prépondérant (USSSL, 1954).

Ces paramètres présentent un effet direct sur les plantes et les propriétés chimiques, physiques et biologique des sols.

Le carbonate de sodium résiduel constitue un critère important pour classer les eaux d'irrigation, car il détermine le danger d'alcalinisation due à l'irrigation. Ce paramètre prédit la tendance du CaCO_3 à précipiter en présence de fortes teneurs en bicarbonates (Bohn et al., 1985).

Le danger d'alcalinisation s'explique par l'apparition de pH élevés dus à la formation de bicarbonate de sodium.

Les risques liés à la toxicité spécifique par l'action de certains ions en solution tels que les chlorures, le sodium et le bore (USSSL, 1954 ; Valles et al., 1989).

La classification conventionnelle de l'USSSL (1954) modifiée par Durand (1960) serait plus adaptée pour l'Algérie. Cette classification se base sur les effets directs des eaux d'irrigation par apport aux sels et particulièrement au sodium.

La classification de l'USSSL préconise des domaines de qualité des eaux pour prédire les effets de ces eaux d'irrigation sur la salinité (C) (tableau IV) et la sodicité (S), avec les risques croissants de 1 à 4 (tableau V).

Tableau IV : Classes de salinité de l'eau (Durand 1960)

Classes (CE (dS/m))	Description
C1 : $\text{CE} \leq 0.25$	Eau non saline, utilisée pour l'irrigation de la plupart des cultures et sur différent types de sols.
C2 : $0.25 < \text{CE} \leq 0.57$	Eau à salinité moyenne, utilisée avec un léger lessivage.
C3 : $0.75 < \text{CE} \leq 2.25$	Eau à forte salinité, utilisée pour les sols à faible drainage, même avec un bon drainage.
C4 : $2.25 < \text{CE} \leq 0.5$	Eau à très forte salinité, inutilisable pour l'irrigation.
C5 : $5 < \text{CE} \leq 20$	Eau à salinité excessive.

Tableau V : Classes du danger d'alcalinisation du sol (SAR)

Classes (CE (dS/m))	Description
S1 : $0 < SAR \leq 10$	Eaux utilisables pour l'irrigation, presque pour tous les sols. Danger d'alcalinisation réduit, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées.
S2 : $10 < SAR \leq 18$	Le danger d'alcalinisation des sols est appréciable dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange, surtout dans les conditions de faible lessivage.
S3 : $18 < SAR \leq 26$	Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une alcalinité dangereuse dans la plupart des sols, à l'exception des sols pauvres en argile. Emploi exigeant la mise en œuvre d'un aménagement spécial assurant un bon drainage et un fort lessivage.
S4 : $SAR > 26$	Eaux souvent inutilisables pour l'irrigation, présentant un fort danger d'alcalinisation. Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation seulement si leur salinité permet l'addition de calcium ou si le sol en contient suffisamment.

Les classes du graphique (figure 9) sont issues de la projection des classes de la CE (tableau III) en abscisses et les classes du SAR (tableau V) en ordonnées, permettent de déterminer la qualité de l'eau (tableau VI).

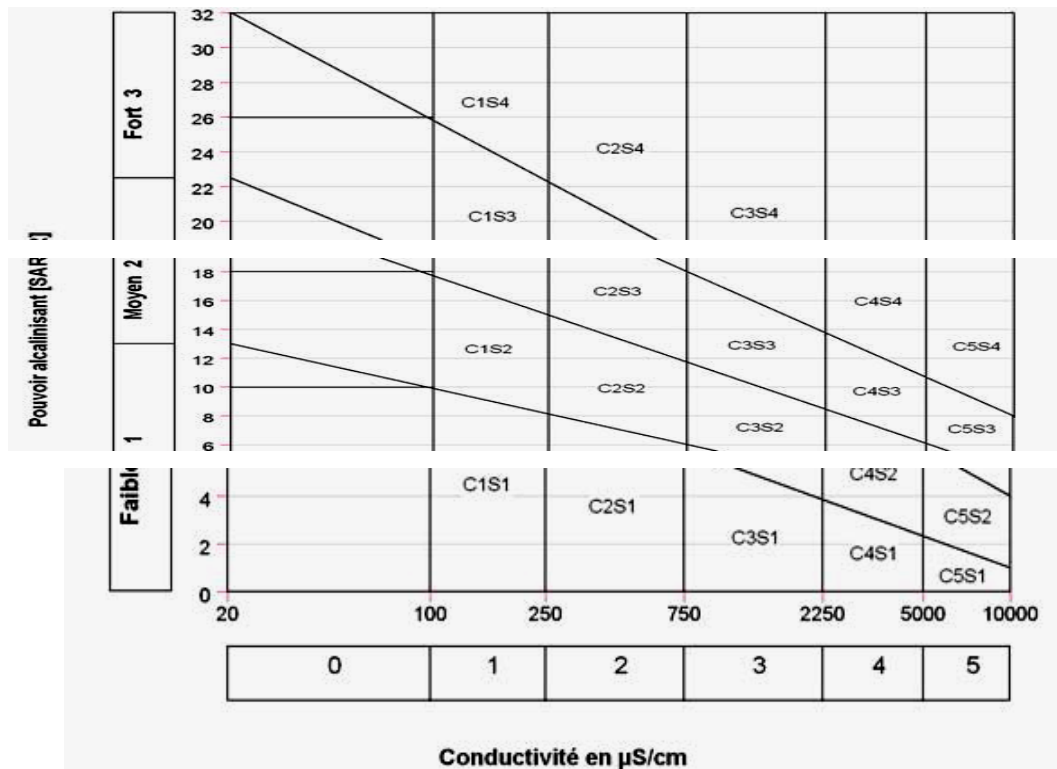


Figure 9 : Classification des eaux d'irrigation par Riverside

Tableau VI : Classes des eaux d'irrigation issues de la projection sur le diagramme de Riverside, modifié.

Classes (CE (dS/m))	Description
C1S1	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, inutilisable avec précaution pour les plantes sensibles.
C1S2, C2S1	Eau de qualité bonne à moyenne à utiliser avec précaution pour les sols mal drainés et également pour les plantes sensibles.
C1S3, C2S2, C3S1	Qualité moyenne à médiocre à utiliser avec précaution nécessite un drainage avec des doses de lessivage.
C1S4, C2S3, C3S2, C4S1	Eau de qualité médiocre à mauvaise, à utiliser avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés.
C2S4, C4S2, C3S3	Eau de très mauvaise qualité, utilisée pour les sols légers, bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité d'une dose de lessivage.
C3S4, C4S3	Qualité très mauvaise à n'utiliser que pour les circonstances exceptionnelles.
C4S4	Eau déconseillée pour l'irrigation.

4. LA FRACTION DE LESSIVAGE (FL)

La fraction de lessivage se définit par la part du volume d'eau d'irrigation qui consiste à dissoudre les sels accumulés dans le sol et à les entraîner en dehors du profil racinaire, et d'affranchir la plante des effets néfastes de la salinité. L'importance de l'accumulation des sels dépend de la qualité de l'eau d'irrigation, de la conduite des irrigations et de l'efficacité du drainage.

Une concentration excessive de sels, engendre une baisse de rendement. Pour empêcher la perte de rendement, il faut maintenir les sels dans le sol à une concentration tolérable par la plante.

Dans les zones arides, la prédiction de la fraction de lessivage est très délicate à cause de la richesse des sols en sels peu solubles tels que les sulfates de calcium et de magnésium.

La fraction de lessivage dépend des paramètres suivants :

- La salinité de l'eau d'irrigation et de la dose d'arrosage
- La texture du sol et de sa conductivité hydraulique
- La tolérance de la plante à la salinité, car la membrane racinaire est très spécifique à chaque culture et par conséquent elle présente différentes affinités et sélectivités aux divers ions.

La plante réagit à la salinité moyenne de la zone racinaire. Ayers et Wescot (1976) estiment que la profondeur utile du sol est divisée en quatre quarts de 30 cm chacun et que 55 % de l'eau évapotranspirée proviennent du premier quart (0 –30 cm), 23% du second quart, 13 % du troisième quart et 9 % du dernier quart. A partir de ces estimations, Rhodes a établi une équation qui permet l'appréciation de la fraction de lessivage.

$$FL = \frac{CEi}{5 \times CEe - CEi} \text{ (Rhodes, 1972)}$$

FL : Fraction minimal de lessivage d'entretien.

CEi: Conductivité électrique de l'eau d'irrigation (dS/m).

CEe: Conductivité électrique du sol qui provoque une chute de rendement de 10%.

Exemple : pour CEi = 5,09 dS/m, CEe = 7 dS/m (Conductivité électrique qui correspond au seuil de tolérance de la culture de blé).

FL = (5,09 / (5 × (7) - 5,09)) = 0.17 soit **FL = 17%**. Il faudra donc à chaque irrigation augmenter la dose de 17%.

CHAPITRE III : LE DRAINAGE

1. DEFINITION

Le drainage agricole ou encore dit l'assainissement agricole englobe diverses techniques qui assurent l'élimination des eaux excédentaires du sol.

Le drainage comporte trois phases : captage ou bien collecte des eaux excédentaires (drainage à la parcelle), acheminement par un réseau de collecteurs ou de fossés et restitution au réseau hydrographique naturel (exutoire).

2. LE BUT DU DRAINAGE

Le drainage, de même que l'irrigation, est une opération qui a pour but de maintenir l'humidité du sol dans les limites requises pour une croissance optimale des végétaux. Dans les régions humides et sub-humides, le drainage a essentiellement pour objet d'évacuer les eaux des pluies trop abondantes ou les excédents d'eau d'irrigation. De même, il s'agit de garder la nappe phréatique à un niveau optimum pour assurer une bonne croissance des cultures.

En revanche, dans les régions arides et semi-arides, où l'agriculture dépend essentiellement de l'irrigation, le drainage est un complément nécessaire de l'irrigation, sauf dans les régions où il est naturellement satisfaisant. Sous ces climats, le drainage a pour but d'éliminer l'eau appliquée en excédent en cours d'irrigation, d'assurer un bilan adéquat et stable des sels dans le sol et de maintenir la nappe phréatique à une profondeur qui convient le mieux au développement des cultures envisagées. Ceci étant admis, il faudrait ne jamais élaborer de projet d'irrigation sans prévoir dans les programmes un système de drainage propre à assurer la pérennité de l'agriculture irriguée.

Le drainage est une condition impérative de la récupération et de la restauration de la fertilité des sols engorgés et en même temps salés et sodiques.

3. EFFETS DES EXCES D'EAU SUR LE SOL

L'excès d'eau dans le sol affecte le degré d'aération, ceci influence directement :

- La diffusion des gaz dans le sol.
- L'activité biologique.
- Le fonctionnement racinaire : respiration, prélèvement des éléments nutritifs.
- La disponibilité des éléments nutritifs.
- Les réactions d'oxydoréduction.
- a. Effet de la durée d'engorgement des sols sur la productivité

Selon Musy (1972), il existe une relation significative entre la durée d'engorgement des sols et la productivité des cultures, comme illustré par les figures 10 et 11.

Les figures 10 et 11 montrent clairement que plus la durée d'engorgement est importante plus la régression de la productivité des cultures est considérable.

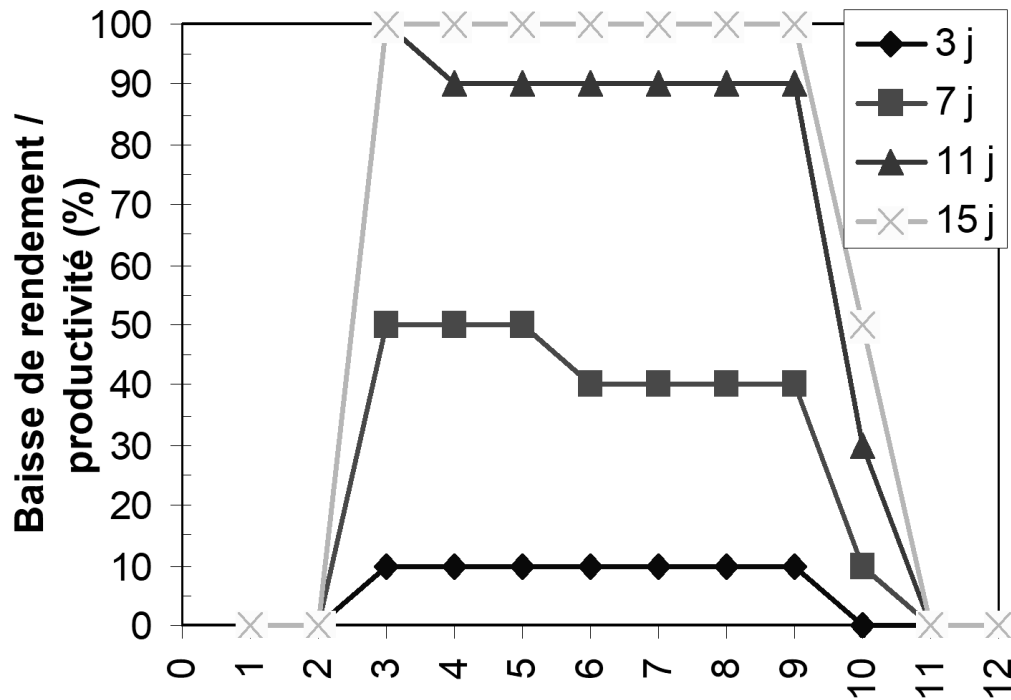


Figure 10 : Effet de la durée d'engorgement des sols sur la productivité pour la culture de Betterave (Musy, 1972)

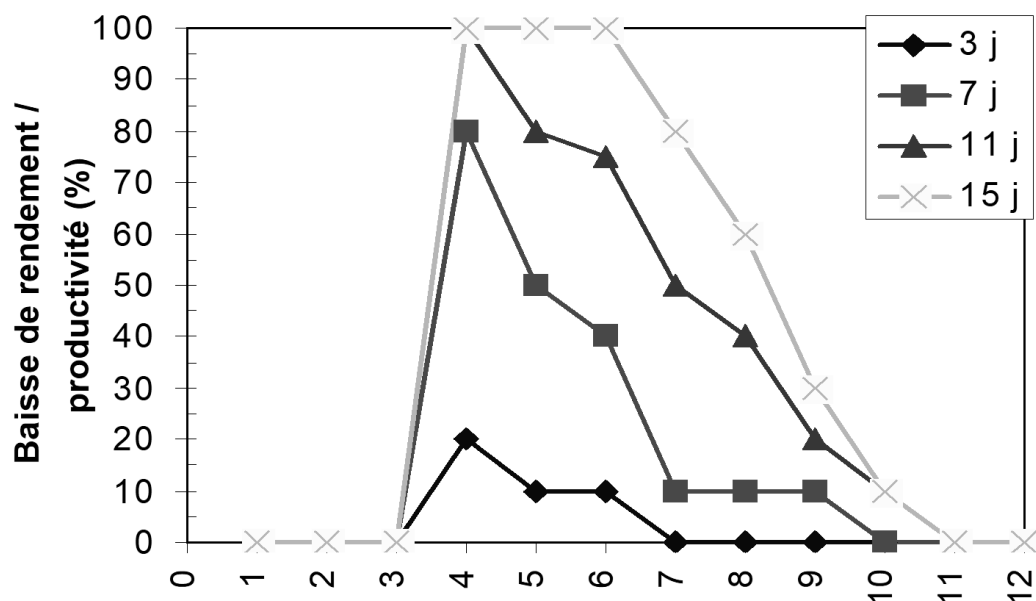


Figure 11 : Effet de la durée d'engorgement des sols sur la productivité pour la culture de Maïs (Musy, 1972)

D'après (Musy, 1972), les valeurs optimales de la profondeur de la nappe en fonction du type de sol et de culture sont indiquées dans le tableau VII.

Tableau VII : Valeur optimale de la profondeur de la nappe en fonction du type de sol et de la culture

Type de plantes	Type de sol	Profondeur optimale
Plantes à enracinement peu profond (prairie, trèfle, légumes)	sol meuble	50-70
	sol moyennement compact	70-100
	sol compact	80-120
plantes à enracinement moyen (pomme de terre, maïs, blé, ...)	sol meuble	60-65
	sol moyennement compact	85-115
	sol compact	95-125
plantes à enracinement profond (betteraves, tournesol, luzerne, sorgho, ...)	sol meuble	70-95
	sol moyennement compact	80-120
	sol compact	95-135

b. Impact environnemental

- Mise en culture de zones "incultes".
- Création de "nouvelles" terres (polders).

- Elimination de zones marécageuses présentant un risque pour la santé.
- Dégradation de la qualité des eaux de surface, à cause des sels et des produits phytosanitaires non évacués.

4. PRINCIPALES METHODES DE DRAINAGE

Les principales techniques de drainage agricole sont le drainage de subsurface et le drainage par drains enterrés.

4.1. Drainage de subsurface

Dans cette méthode, il y a deux techniques, par fossés à ciel ouvert ou par drains enterrés. Le choix de la technique à appliquer dépend principalement de la distance verticale entre le niveau de la nappe et la surface du sol.

Par ailleurs, pour une nappe proche du sol, il est conseillé d'adopter la technique des fossés à ciel ouvert, dans le cas d'une nappe profonde, nous faisons recours aux drains enterrés.

4.1.1. Drainage par fossés à ciel ouvert

Dans cette technique, le rabattement de la nappe est assuré par le creuser d'un canal dans la terre agricole (photo 5).

Malheureusement, cette technique engendre une perte de surfaces cultivables et l'apparition des maladies (hydrique). En plus, il y a une difficulté d'accès aux fossés (entretien onéreux).



Photo 5 : Drainage par fossés à ciel ouvert (Mermoud, 2006)

4.1.2. Drainage par drains enterrés

Dans cette technique, des tuyaux perforés sont installés dans le sous-sol (enterrés), ils se jettent dans des collecteurs qui évacuent l'eau vers un émissaire (photo 6).

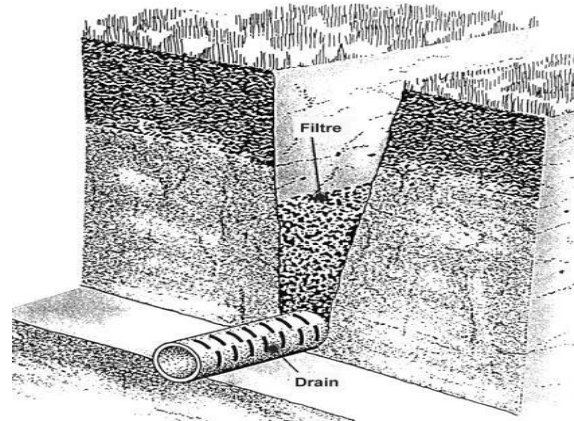


Photo 6 : Drain perforé enterré (Mermoud, 2006)

En plus de ces techniques classiques, dans le drainage par drains enterrés, il y a des techniques associées telles que le drainage-Taupe

4.1.3. Le drainage-Taupe : associe un réseau de drains conventionnel à grand écartement surmontés d'un remblai poreux, à un réseau dense de galeries taupes. Ces galeries taupes sont réalisées à l'aide d'un tracteur solidaire d'une charrue taupe munie d'un boulet expanseur (figure 12). Ce dernier provoque un lissage et un compactage des parois de la galerie qui conserve sa forme. Les sols doivent donc être plastiques (teneur en argile élevée et humidité suffisante).

Le taupage peut s'envisager dans plusieurs situations, où les techniques conventionnelles de drainage agricole par tuyau enterré sont économiquement inacceptables pour certains agriculteurs :

- a. Les sols à très faible perméabilité où le calcul conventionnel conduit à de très faibles écartements entre les drains, d'où des coûts trop élevés ;
- b. Les sols lourds riches en argiles gonflantes où la tenue de la tranchée de pose des drains ne peut être assurée que par la mise en place de remblai artificiel, le plus souvent du gravier.

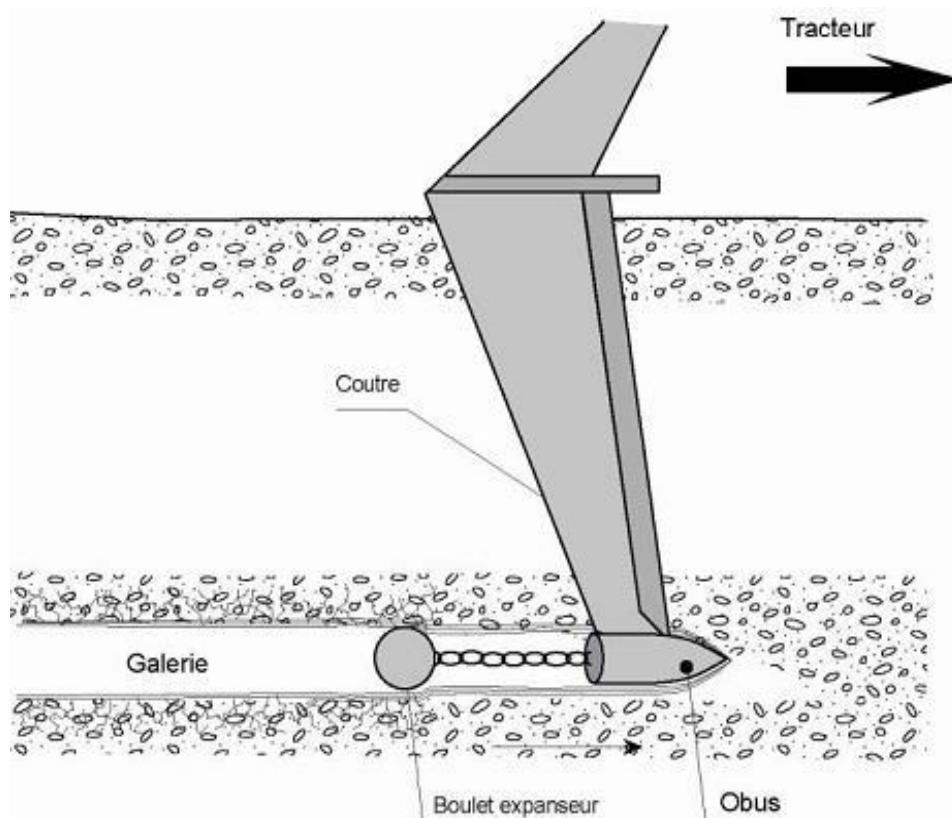


Figure 12 : Réalisation des galeries taupes (Mermoud, 2006)

Il existe d'autres techniques qui permettent de rabattre la nappe, telles que le drainage par puits qui consiste à provoquer un abaissement de la nappe par pompage dans un réseau de puits régulièrement distribués dans l'espace, de sorte à ce que leurs cônes de dépression se recoupent. Cette méthode utilisée principalement lorsque la nappe doit être abaissée fortement, en particulier pour prévenir une salinisation du sol par remontées capillaires (salinisation secondaire).

La réalisation d'un réseau de drainage nécessite la réunion des critères suivants :

- Coût, disponibilité locale.
- Résistance à l'écrasement.
- Efficacité hydraulique.
- Caractéristiques chimiques du sol.
- Durabilité.

5. BESOINS EN DRAINAGE

La détermination des besoins en drainage est importante afin de se rendre compte de l'importance du réseau de drainage artificiel nécessaire. Sur la base des estimations des besoins en drainage, qu'on arrive à établir correctement le dimensionnement du réseau de drainage (la profondeur, l'écartement des faussés et la capacité d'évacuation des drains).

Il y a plusieurs formules pour le calcul de l'écartement des faussés de drainage. Pour l'application de ces formules, il faut disposer de deux séries de données entièrement distinctes :

- Les critères relatifs au drainage ou besoin en drainage : la profondeur de la nappe phréatique (niveau minimum acceptable) et le débit du drainage correspondant, c'est à dire le volume d'eau à éliminer.
- Les conditions physiques du profil humide du sol : concernant la conductivité hydraulique du sol, sa porosité effective et la profondeur de la couche imperméable.

A partir de ces données, nous pouvons calculer la profondeur et l'écartement des fossés de drainage.

Il faut noter que pour le cas d'un sol salé les besoins en drainage sont supérieurs aux besoins normaux de ce même sol, à cause de la fraction de lessivage qui est préconisée pour ces sols. Donc, il faut construire des fossés supplémentaires.

6. DIMENSIONNEMENT D'UN RESEAU DE DRAINAGE

Pour l'élaboration du réseau de drainage, il faut :

- L'étude du modelé du terrain, reconnaissance des talwegs et des lignes de crête ;
- L'esquisse préliminaire : disposition des collecteurs tracés des profils en long ;
- La détermination de la distance de raccordements (100 à 150 m) ;
- La détermination des longueurs, pentes et profondeurs.

6.1. Les paramètres de dimensionnement

Les caractéristiques de réseau sont : l'écartement des drains ou fossés, leur profondeur, les débits à évacuer, la dimension des drains et les collecteurs. Ils se définissent sur la base de différents paramètres, en particulier la durée admissible de submersion, le débit caractéristique de drainage, la profondeur souhaitable de la nappe et les caractéristiques du sol.

6.2. Calcul de l'écartement des drains

La figure 13 représente les principaux paramètres pris en compte pour le calcul de l'écartement des drains. Le calcul de l'écartement des drains nécessite au minimum la spécification des paramètres suivants:

- Régime d'apport d'eau en surface (q) ;
- Profondeur minimale de la nappe (H) ;
- Profondeur réelle, en dessous des drains, de l'horizon imperméable (D) ;
- Ecartement entre les drains (E) ;
- Hauteur de charge hydraulique (h) ;
- Conductivité hydraulique de la zone saturée du sol (K_s).

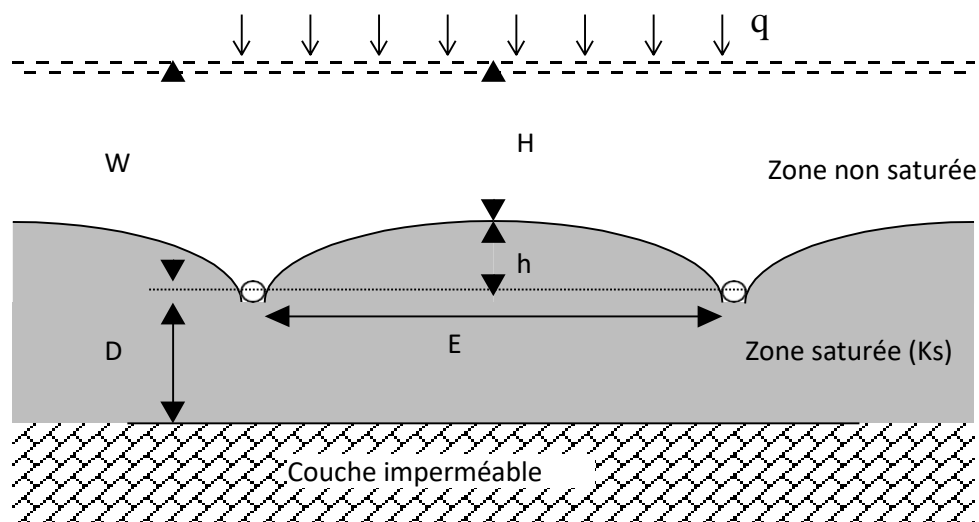


Figure 13 : Représentation schématique des principales variables pour la mise en place d'un réseau de drainage (Biielders, 2002)

Avant de calculer l'écartement des drains, les débits à évacuer et l'équation de la nappe, il est important de se baser sur les hypothèses de Dupuit-Forchheimer :

- Milieu homogène et isotrope ;
- Drains posés sur le substratum imperméable ;
- Composante verticale des vitesses négligeable ;
- Vitesses identiques en tous points d'une même verticale.

L'écartement est calculé par l'expression suivante :

- Cas 1 : Drains reposant sur une couche imperméable, en régime d'alimentation permanent $E = 2 \times h \sqrt{\left(\frac{ks}{q}\right)}$.
- Cas 2 : Fossés reposant sur une couche imperméable en régime variable.
- $E = 2\sqrt{\left(\frac{ks}{q}\right) (h^2 - Z0^2)}$.

E : Ecartement entre deux drains (m) ;

h : Profondeur des drains (m) ;

ks : Conductivité hydraulique (m/s) ;

Z0 : Hauteur de l'eau dans le drain (m) ;

q : Débit par unité de surface ($m^3/s/m^2$) (Débit caractéristique).

W : Profondeur d'installation des drains

Les écartements courants des drains sont comme suit :

- Sols compacts 10 - 15 m ;
- Sols lourds 15 - 20 m;
- Sols limono-sableux 15 - 25 m;
- Sols sableux 20 - 35 m.

6.3. Caractéristiques géométriques des drains

a) Profondeur des drains

- Minimum : 80 cm ;
- Maximum : 1.5 à 2 m.

Profondeur fréquemment imposée pour un horizon peu perméable entre autres.

Les conditions locales à prendre en considération sont les conditions pédologiques, les risques d'assèchement excessif du sol et les risques de colmatage racinaire et du gel.

- Caractéristiques du sol

- Conductivité hydraulique à saturation ;
- Porosité ;
- Granulométrie des différents horizons.

b) Profondeur des collecteurs

Généralement, les collecteurs sont entourés d'un filtre d'enrobage en gravier pour accroître leur résistance aux contraintes externes.

Il faut éviter les profondeurs supérieures à 3 m.

c) Longueur maximale des files de drains (L)

La longueur maximale des files de drains est fréquemment imposée par la topographie, l'emplacement des collecteurs et la surface à drainer.

Écoulement à surface libre $\Rightarrow L = f$ (débit collecté, pente, diamètre et type de drains).
Généralement, la longueur max est entre 200 et 300 m.

d) Pente des drains

La pente des drains est souvent conditionnée par la topographie, la pente minimale varie entre 1 à 2 %.

La conception d'un réseau de drainage nécessite :

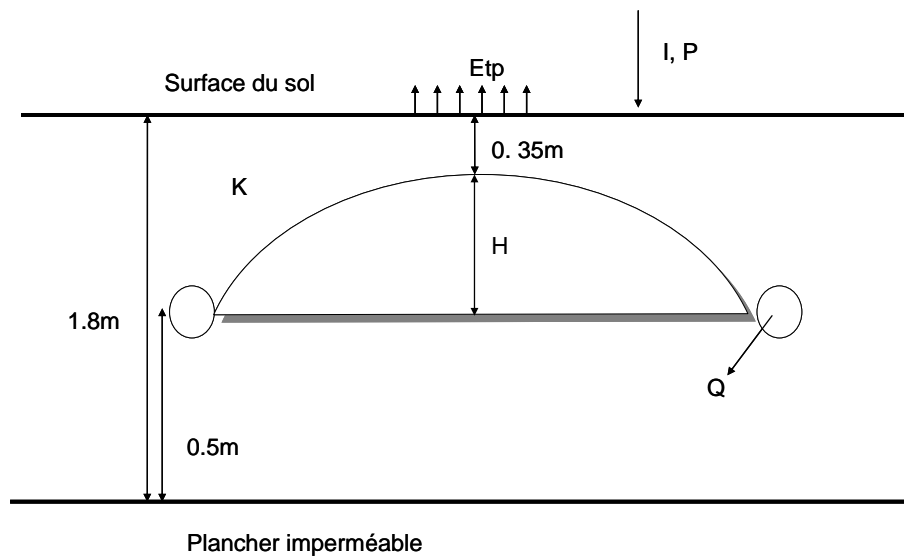
- Étude de l'environnement hydrologique ;
- Recherche du débit caractéristique de drainage ;
- Choix de la profondeur des drains et de la profondeur minimale de la nappe.

7. MINI PROJET DE DRAINAGE - EXEMPLE DE CALCUL

Soit une parcelle d'agrumes de 1.5 ha. Le sol a une conductivité hydraulique à saturation égale à 0,9 m/j et une salinité moyenne de 3,9 dS/m. Le taux d'échange de sodium est égal à 6%. La pluviométrie annuelle (p) est de 550 mm et l'évapotranspiration atteint 1200mm (environ 3,40 mm/j). L'eau d'irrigation a une salinité de 3.5 g/l et un taux de sodium de 5 meq/l. Elle est distribuée à raison de 6000 m³ ha⁻¹ an⁻¹ pour les besoins en eau des agrumes (ETM= 650 mm). Un coefficient de proportionnalité de 0,8 a été établi entre e le résidu sec et la conductivité électrique de l'eau d'irrigation.

Un réseau de drainage souterrain a été installé pour un débit de projet de 1.2 mm/ j ; il évacue une eau à une salinité de 7 g/l avec un débit moyen (Dw) de 0,35 l/s ha. Le système hydraulique est représenté par le schéma ci-dessous.

- 1- Calculer les termes du bilan hydrique, et en déduire le stock d'eau dans le sol en mm.
- 2- Calculer l'écartement des drains (E) en régime permanent en s'appuyant sur le schéma présenté ci-dessous.



1) Equation du bilan hydrique :

$$P + I - ETM - Dw = \Delta S \text{ (stock d'eau dans le sol)}$$

- $I = 600 \text{ mm}, P = 550 \text{ mm}, ETM = 650 \text{ mm}$
- $Dw = 0,35 \text{ l/s/ha} = 0,126 \text{ mm/h} = 1103,76 \text{ mm}$

$$2) \quad \Delta S = 600 + 550 - 650 - 1103,76$$

$$\Delta S = -603,76 \text{ mm}$$

$$3) \quad E^2 = 4 K H^2 + 8 K d H / q_c$$

- $H = 1,8 - 0,5 - 0,35 = 0,95 \text{ m}$
- $E^2 = 5587,5 \Rightarrow E = 74,75 \text{ m}$, l'écartement est de 74.75 m

Conclusion

La quantité d'eau apportée lors de chaque irrigation doit être précisément ajustée afin de ne pas dépasser la capacité au champ du sol, ce qui permet de limiter le ruissellement et de contrôler le drainage de l'excès d'eau. En l'absence de drainage, les pertes d'éléments nutritifs par lixiviation restent généralement limitées ; cependant, dans les sols salés, un drainage maîtrisé devient nécessaire.

L'irrigation des sols salés requiert en effet l'application d'une fraction de lessivage destinée à évacuer les sels accumulés en dehors de la zone racinaire. Cet objectif ne peut être atteint qu'à travers la mise en place d'un réseau de drainage efficace. D'un point de vue agronomique, le drainage contribue à l'amélioration des conditions de croissance des cultures en réduisant la salinité de la solution du sol, en favorisant une meilleure aération du système racinaire et en limitant les phénomènes d'asphyxie des racines. Il permet ainsi d'optimiser l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs, d'améliorer le développement racinaire et, par conséquent, d'accroître le rendement et la stabilité de la production agricole.

Par ailleurs, l'intensité horaire de l'irrigation ne doit pas dépasser la capacité d'infiltration du sol, afin d'éviter l'engorgement en surface, la dégradation de la structure du sol et les risques de ruissellement, susceptibles d'affecter négativement la performance agronomique des systèmes de culture.

Références bibliographiques

Aubert, G. (1976). Les sols sodiques en Afrique du Nord. Annales de l'Institut National Agronomique d'Alger, 6(1), 185–195.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1976). Water quality for agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Amezketta, E., & Aragiüés, R. (1995). Hydraulic conductivity, dispersion and osmotic explosion in arid-zone soils leached with electrolyte solutions. Soil Science, 159, 287–295.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Bouma, J. (1991). Influence of soil macroporosity on environmental quality. In Advances in Agronomy (Vol. 46, pp. 1–34). Academic Press.

Blumwald, E., Aharon, G. S., & Apse, M. P. (2000). Sodium transport in plant cells. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes, 1465, 140–151.

Bielders, C. (2002). Notes de cours. Université Catholique de Louvain.

Boucher, J-M. (2007). L'eau : les techniques d'irrigation en action. <https://www.consoglobe.com/eau-techniques-irrigation-action-2035-cg/> consulter juin 2021.

Bui, E. N. (2017). Causes of soil salinization, sodification, and alkalinization. In Ghassemi, F., Jakeman, A. J., & Nix, H. A. (1995). Salinization of land and water resources: Human causes, extent, management and case studies. University of New South Wales Press.

Domènech, L. (2015). Improving irrigation access to combat food insecurity and undernutrition: A review. Global Food Security, 6, 24–33.

Hénin, S. (1977). Cours de physique du sol : Tome 2. L'eau et le sol – Propriétés mécaniques – La chaleur et le sol. ORSTOM/Editest.

Hillel, D. (2004). Introduction to Environmental Soil Physics. Academic Press, New York.

Hanafi, S. (2011). Approche d'évaluation de la performance des systèmes irrigués à l'échelle des exploitations agricoles : Cas du périmètre irrigué de Borj Toumi (vallée de la Medjerda, Tunisie) (Thèse de doctorat). AgroParisTech.

Huang, H., Guo, X., Li, D., Liu, M., & Wu, J. (2011). Identification of crucial yeast inhibitors in bio-ethanol and improvement of fermentation at high pH and high total solids. *Bioresource Technology*, 102(16), 7486–7493.

Herrera, C., Custodio, E., Chong, G., Lambán, L. J., Riquelme, R., Wilke, H., Jódar, J., Urrutia, J., Urqueta, H., Sarmiento, A., Gamboa, C., & Lictevout, E. (2016). Groundwater flow in a closed basin with a saline shallow lake in a volcanic area: Laguna Tuyajto, northern Chilean Altiplano of the Andes. *Science of the Total Environment*, 541, 303–318.

HAMDANI, N., & Amir, S. (2020). Conception et réalisation d'un système d'irrigation intelligent (Mémoire de master). Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

IUSS Working Group WRB. (2014). World reference base for soil resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (World Soil Resources Reports No. 106). FAO.

Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Kempen, B., & de Sousa, L. (2019). Global mapping of soil salinity change. *Remote Sensing of Environment*, 231, Article 111260.

Jamil, A., Riaz, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2011). Gene expression profiling of plants under salt stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(5), 435–458.

Jisheng, X., Wei, G., Bingzi, Z., Meiqi, C., Lei, M., Zhongjun, J., & Jiabao, Z. (2021). Bacterial community composition and assembly along a natural sodicity/salinity gradient in surface and subsurface soils. *Applied Soil Ecology*, 157, Article 103731.

Laaboudi, A., Allaoua, C., & Kharssi, M. (2004). Les besoins en eau de la culture du blé dans les régions désertiques : Cas de la wilaya d'Adrar. *Recherche Agronomique*, 8(15), 7–19.

Lee, S. (2025). Irrigation essentials for water conservation. Number Analytics Blog.

Laoufi, H., (2025). Contribution à l'étude pédologique et géochimique des sols salés de l'éco-complexe endoréique sétifien (Thèse de doctorat). École Nationale Supérieure d'Agronomie (ENSA).

McNeal, B. L., & Reeve, R. C. (1964). Elimination of boundary-flow errors in laboratory hydraulic conductivity measurements. *Soil Science Society of America Proceedings*, 28(5), 713–714.

Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. (2018). Statistiques des terres irriguées. MADR.

Musy, A. (1972). Enquête internationale sur les bases scientifiques de l'assainissement des sols, les méthodes d'assainissement et leur efficacité. Secrétariat général de la Commission internationale du Génie rural.

Madramootoo, C. A. (2000). Environmental considerations in irrigation development. In *Irrigation and Drainage Paper* (Chap. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Maillard, J. (2001). Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne : Risques et recommandations. Handicap International.

Mermoud, A. (2006). Aménagement et équipement du territoire : Élément de drainage des sols agricoles (Polycopié). École polytechnique fédérale de Lausanne.

Mustafa, L. M., et al. (2020). Irrigation efficiency, drain outflow and yield responses to drain depth in the Nile delta clay soil, Egypt. *Agricultural Water Management*, 234, Article 106123.

Mailhol, J. C., Ruelle, P., Khaledian, M., Mubarak, I., & Rosique, P. (2009). Systèmes d'irrigation et économies d'eau sous climat méditerranéen : Étude expérimentale et modélisation. In *Durabilité des systèmes de cultures en zone méditerranéenne : Gestion des ressources en eau et en sol* (Actes du symposium AGDUMED, pp. 156–165). Rabat, Maroc.

Matsoukis, A. (2025). Irrigation water in agriculture: Challenges and interventions in an era of global boiling. *Current Agriculture Research Journal*.

Nijimbere, S. (2014). Physico-chimie des sols rizicultivés affectés par la salinité dans la basse vallée de la Rusizi au Burundi (Thèse de doctorat). Université Catholique de Louvain.

Poirée, M., & Ollier, C. (1978). Assainissement agricole : Drainage par tuyaux ou fossés, aménagement des cours d'eau et émissaires (5e éd.). Eyrolles.

Pons, Y., & Gerbaud, A. (2005). Classification agronomique des sols marais à partir de la relation entre sodicité et stabilité structurale. *Étude et Gestion des Sols*, 12(3), 229–243.

Pitman, M. G., & Läuchli, A. (2002). Global impact of salinity on agricultural ecosystems. In A. Läuchli & U. Lüttge (Eds.), *Salinity: Environment–plants–molecules* (pp. 3–20). Kluwer Academic Publishers.

Rhoades, J. D. (1972). Quality of water for irrigation. *Soil Science*, 113, 277–284.

Radcliffe, D. E., & Rasmussen, T. C. (2002). Soil water movement. In *Soil physics companion* (pp. 85–122). CRC Press.

Reynolds, T. W. (2002). Soil porosity and water release characteristics: Impact on root zone storage capacity. *ScienceDirect Topics*.

Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth-promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131.

Skaggs, R. W., Fausey, N. R., & Evans, R. O. (2012). Drainage water management. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(6), 167A–172A. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.6.167A>

Schwab, C. (2003). Les « os à impression et éraillures » de la grotte d'Isturitz (Pyrénées-Atlantiques, France). In M. Patou-Mathis, P. Cattelain, & D. Ramseyer (Dir.), *L'industrie osseuse pré- et protohistorique en Europe : Approche technologique et fonctionnelle* (Actes du 14e Congrès international de l'UISPP, Colloque 1.6, pp. 9–18). *Bulletin du Cercle archéologique Hesbaye-Condruz*, 26.

Servant, J. M. (1970). Étude expérimentale de l'influence des conditions salines sur la perméabilité des sols salés de la région méditerranéenne française. *Annales de l'Institut National Agronomique d'El-Harrach*, 6, 225–245.

Shahid, S. A., & Al-Shankiti, A. L. (2013). Sustainable food production in marginal lands: Case of GDLA member countries. *International Soil and Water Conservation Research*, 1, 24–38.

Soutter, M., Mermoud, A., & Musy, A. (2007). *Ingénierie des eaux et du sol : Processus et aménagements*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Sands, G. R. (2018). Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 24(1), 1–32.

Singh, A. (2019). An overview of drainage and salinization problems of irrigated lands. *Irrigation and Drainage*, 68(3), 551–558.

Tiercelin, J. R., & Vidal, A. (2006). *Techniques d’irrigation* (2e éd., pp. 549–583). Lavoisier.

Todorović, M. (2005). Crop water requirements. In J. H. Lehr & J. Keeley (Eds.), *Water encyclopedia: Surface and agricultural water* (pp. 557–558). John Wiley & Sons.

U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (Agriculture Handbook No. 60). U.S. Government Printing Office.

Vallès, V., Bertrand, R., Bourgeat, F., N’Diaye, M. K., & (1989). Le concept d’alcalinité résiduelle généralisée et l’irrigation des sols sodiques : Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l’oued Medjerda (Tunisie). *Agronomie Tropicale*, 44, 157–163.

Van Hoorn, J. W., & Van Alphen, J. G. (2006). Salinity control. In H. P. Ritzema (Ed.), *Drainage principles and applications* (pp. 533–600). ILRI.

Yang, J., et al. (2019). Water use efficiency in irrigation. *Water*, 11, Article 1758.

Zinck, J. A., & Metternicht, G. (2009). Soil salinity and hazard. In G. Metternicht & J. A. Zinck (Eds.), *Remote sensing of soil salinization: Impact on land management* (pp. 3–20). CRC Press / Taylor & Francis Group.