



COURS BASES FONDAMENTALES DU DRAINAGE AGRICOLE



Département: GENIE RURAL, HYDRAULIQUE AGRICOLE

(Cours en ligne)

Cours présenté par **Dr. BOURAS-CHEKIRED F/Z**

Aux étudiants de Deuxième année Cycle Supérieur (2ème-année-SC)

Année universitaire : 2022 - 2023

AVANT-PROPOS

Le drainage et l'assainissement agricole sont des techniques complexes et évolutifs. La complexité de ces techniques réside d'une part, dans la multiplicité des acteurs et des interlocuteurs et, d'autre part dans les nombreux domaines scientifiques et techniques impliqués. Le caractère évolutif de ces techniques découle non seulement des progrès scientifiques et technologiques enregistrés dans les domaines impliqués, mais aussi de l'enjeu économique de l'opération. Le but du présent cours est d'apporter au lecteur des connaissances sur la manifestation des excès d'eau et leurs conséquences agro-économiques et sur la salinisation des sols sous irrigation et les moyens de contrôle de cette salinisation.

Objectifs

Dans ce module, nous détaillons la conception du drainage horizontal en sol peu profond. Nous définirons en premier les modes de drainage, le réseau et ses composantes, les études nécessaires à la projection d'un réseau puis nous présenterons les bases de l'application hydraulique du drainage agricole. Une deuxième partie est consacrée à la lutte contre la salinité notamment sur les techniques de lessivage des sols agricoles.

Première partie

Le drainage agricole et l'excès d'eau

Chapitre I : Généralités

1. Introduction

Dans les conditions de notre époque, il est évident que la gestion rationnelle de l'eau disponible est devenue une nécessité absolue pour l'agriculture est ce dont son propre intérêt et en partage avec les autres activités de l'homme.

Dans ce contexte, drainage et irrigation, séparément ou le plus souvent conjointement, doivent intervenir pour corriger le cycle de l'eau dans le processus de production agricole. Cette intervention impose l'aptitude à maîtriser correctement et rationnellement les volumes d'eau manipulés sous peine de connaître bien les déboires comme nous le verrons ultérieurement.

Cette nécessité de maîtrise rationnelle a induit le développement de l'étude de l'irrigation et de drainage en tant que science et technique.

1.1. Définition

Au sens large le terme "*drainage des terrains agricoles*" peut être défini comme suit : "élimination par voie naturelle ou artificielle des eaux de surface et/ou souterraine superflues par rapport aux besoins de la production végétale".

Le drainage par voie artificielle, qui est le problème qui nous intéresse, peut être défini comme suit : "tout travaux ayant pour objet l'évacuation contrôlée, intensive dans les délais déterminés et courts, en tous les points d'une parcelle et d'une façon uniforme des eaux excédentaires qui saturent la couche superficielle du sol ou stagnent à sa surface". Ou "tous travaux ayant pour objectif le contrôle et la maîtrise du plan d'eau afin d'empêcher que celui-ci ne sature les couches superficielles du sol pendant un temps trop prolongé.

Cette définition a été proposée pour les régions humides et les zones arides et semi-arides, on pourrait la corrigée de la manière suivante "des eaux excédentaire et des sels associés. En matière d'évacuation des eaux

excédentaire, le terme assainissement englobe tous les procédés d'évacuation des eaux nuisibles d'une zone limitée, on parle ainsi d'assainissement urbain (égouts et traitement des eaux usées) et d'assainissement agricole, s'il s'agit des terres agricoles.

L'assèchement concerne les opérations sur les zones où la submersion et le manque d'émissaire (exutoire pour les eaux) interdisent la mise en valeur.

L'aménagement des émissaires concerne la construction et la restauration d'un réseau de conduites (canaux et rivières) destiné à transporter les eaux drainées hors périmètre.

1.2. But de drainage

Le drainage d'une zone agricole a pour but principal l'évacuation des eaux et des sels dans le sol, par un système d'artificial d'évacuation, globalement, on peut discerner les cas suivants :

1. Prévention des inondations temporaires : provoquées par une pluie abondante, une faible perméabilité du sol, ou un ruissellement superficiel vers une dépression du terrain. Ces inondations ont un caractère irrégulier et se produisent dans la saison hivernale.

En Algérie on les rencontre dans les régions à climat humide, où il y a au moins une saison pluvieuse, par exemple : sur les sols lourds de la Mitidja, la vallée de l'oued Cheliff et sur la plaine d'Annaba (Bounnamoussa). Par ailleurs, on trouve localement des parcelles inondées dans la zone côtière et dans les vallées alluviales des oueds mineurs.

2. Assèchement des terrains vierges : Il s'agit d'une mise en valeur des terrains pas encore cultivés, qui se trouvent en permanence ou périodiquement submergés. Par l'installation d'un réseau complet de drainage ou cherche à abaisser la nappe à un niveau acceptable pour les cultures. On

trouve ces terrains dans les zones parfois marécageuses comme la partie ouest de la Mitidja.

3. *Prévention contre la salinisation du sol* : la salinité du sol est un des problèmes majeurs dans tous les périmètres irrigués des zones arides ou semi-arides. Par un réseau de drainage, on vise un lessivage des sels solubles qui s'accumulent dans le sol. En Algérie on rencontre le problème des sels dans tous les périmètres irrigués où l'on irrigue avec de l'eau salée (abadla).

Les réseaux de drainage ont été réalisés dans les palmerais du sud (Biskra, Touggourt) ; ils existent des projets de drainage pour les périmètres de Relizane (Bas cheliff).

4. *Protection des grands ouvrages* : Afin d'éviter la saturation des fondations des lignes des barrages en terres, on utilise une technique de drainage adaptée au type d'ouvrage.

1.3. Inconvénients des sols humides

L'eau est un élément indispensable dans le développement d'une plante. Cependant une abondance des eaux dans le sol peut avoir un effet néfaste sur les cultures et sur les propriétés du sol. Voici les raisons pour lesquelles un bon drainage est aussi important qu'une alimentation en eau.

1. Les sols humides sont imperméables à l'air

Les racelles ont une activité de respiration lorsque la quantité d'eau est trop grande, la circulation d'air dans les interstices gorgés d'eau devient impossible et la plante meurt d'asphyxie. En outre, tous les processus microbiologiques et chimiques dans le sol s'arrêtent ou se produisent avec une moindre intensité. Ceci peut tout à fait modifier le caractère d'un sol.

Le drainage permet une aération du sol par l'évacuation des eaux de saturation et par conséquence une remise en marche des réactions chimiques et physiologiques.

2. Les sols humides sont froids

L'échauffement des sols humides par la chaleur solaire est plus difficile, l'eau en excès dans le sol est soumise à une évaporation abondante d'où un abaissement de la température à la surface. On constate une différence de température de la terre sèche par rapport à la terre humide, d'environ 7,5 pour la plante (Thermopérioditisme), cette température plus basse implique un retard de démarrage à la croissance suivie d'une chute de rendement par rapport à la normale.

Le drainage permet une croissance précoce est donc une période plus longue pour la réalisation du cycle végétatif et ainsi de meilleures potentialités en matière de rendement.

3. Les sols humides empêchent la pénétration des racines

Les racines d'une plante ne se développent pas dans un milieu saturé (sauf quelques exceptions : le riz).

4. Un sol humide en excès perturbe le déroulement des façons culturales

Le travail du sol pour préparer le semis ne peut se faire sur un sol excessivement humide ;

L'énergie à mettre en œuvre est trop importante, pour un labour la dépense est de 25 à 30% supérieure par rapport à un sol normalement humide ;

Le passage d'engin sur un sol humide provoque souvent des tassements importants, cela entraîne à l'évidence une diminution de la fertilité physique du

sol (perte de conductivité hydraulique, obstacle mécanique à la pénétration des racines).

5. Une nappe non contrôlée en périmètre irrigué peut créer des problèmes de salinisation

Il s'agit du problème majeur des périmètres irrigués dans les régions arides et semi-arides (également dans les régions limitrophes de ces zones).

En Algérie c'est un phénomène qui se développe dans certaines régions où la fertilité des terrains irrigués est menacée par l'accumulation des sels.

La salinisation constitue un problème grave et complexe, les régions concernées par ce phénomène sont caractérisées par une faible pluviométrie et une très grande évaporation.

La production agricole intensive requiert une irrigation relativement importante parfois supérieure à 10.000 m³/ha. L'eau d'irrigation contient toujours une certaine quantité de sel.

L'eau apportée par irrigation est "réexportée" par évaporation et les sels, initialement contenus dans cette eau, s'accumulent dans le sol (parfois jusqu'à 50 tonnes /ha et année).

(Au bout de quelques années le sol peut être totalement contaminé pour éviter cela, les techniciens préconisent de fournir au sol plus d'eau que nécessaire afin de provoquer une percolation d'eau en profondeur avec entraînement des sels (cela s'appelle le lessivage).

Remarquons que fréquemment les agriculteurs des périmètres irrigués fournissent au sol beaucoup plus d'eau que nécessaire. Ils ne le font pas toujours volontairement mais tout simplement par manque de maîtrise des volumes d'eau manipulés. Malheureusement les zones concernées sont souvent des dépressions avec couches imperméables à plus ou moins faible profondeur, le drainage naturel de ces périmètres s'avère bien souvent

insuffisant pour l'évacuation des eaux excédentaires. Conséquence, les nappes montent, elles s'approchent de la surface (montée capillaire) elle s'évapore et le sel qu'elle contient s'accumule.

L'objectif d'un réseau de drainage sera dans ce cas : L'évacuation des excès d'eau d'irrigation en vue d'empêcher la nappe de s'approcher trop près de la surface du sol et éviter ainsi l'apparition d'un processus d'accumulation de sels. Ces quelques éléments d'information démontrent à l'évidence l'intérêt et la nécessité du drainage dans certaines situations bien définies).

Avant d'aborder le problème fondamental de dimensionnement des réseaux de drainage, il nous semble intéressant de présenter les diverses techniques de drainage existantes).

1.4. Fonctions du drainage

Dans les zones tempérées ou humides le drainage a comme fonctions :

1. Amélioration de l'aération du sol ;
2. Réduction des pertes d'azote (dénitrification) ;
3. Améliorer la portance du sol ;
4. Meilleur contrôle du calendrier cultural ;
5. Réchauffement plus rapide du sol au printemps.

Et en zones arides et semi-arides les objectifs du drainage sont les suivants :

1. Elimination des eaux d'irrigation en excès (prévention des remontées de nappe) ;
2. Elimination des eaux d'irrigation chargée en sels et autres composés polluants ;
3. Elimination des zones d'eau stagnante ;
4. Lessivage des sols et contrôle de la salinité.

1.5. Impact environnemental

Les Impacts environnementaux sont les suivants :

Impacts Positifs :

1. Mise en culture de zones incultes ;
2. Création de nouvelles terres ;
3. Elimination de zones marécageuses présentant un risque pour la santé.

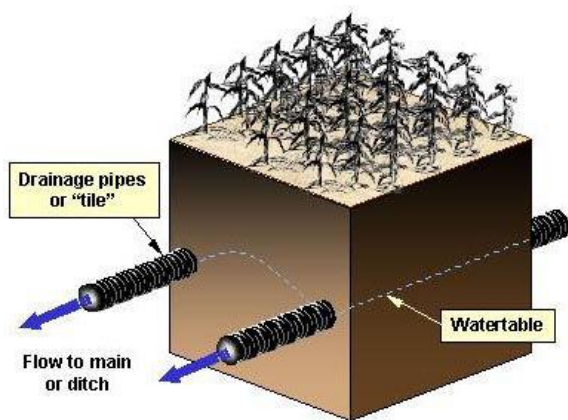
Impacts négatifs :

1. Disparition et dégradation des zones humides.

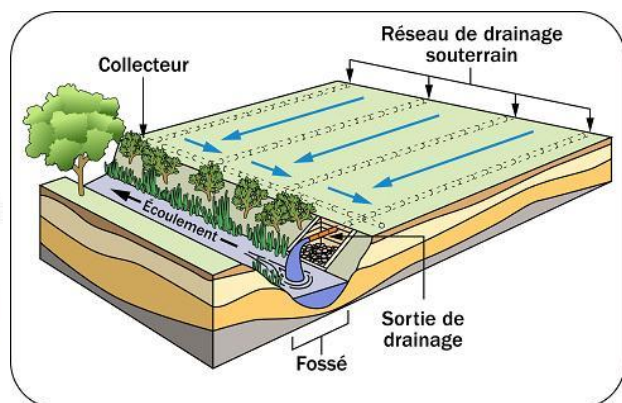
1.6. Le réseau de drainage et ses composantes

Un système de drainage est composé d'un réseau de drains permettant de rabattre la nappe à un niveau inférieur à celui de la profondeur d'enracinement. Il est peut-être composé soit de :

1. Conduites enfouies dans le sol (drainage souterrain), soit de fossés à ciel ouvert. Dans ces deux cas on parlera de drainage horizontal (Fig.1) ;
2. Dans certains cas, on effectue également le prélèvement des excès d'eau par pompage à partir de puits verticaux. On parlera alors du drainage vertical (Fig.2).



a) Tuyaux enterrés



b) Fossés à ciel ouvert

Fig1 : Drainage souterrain

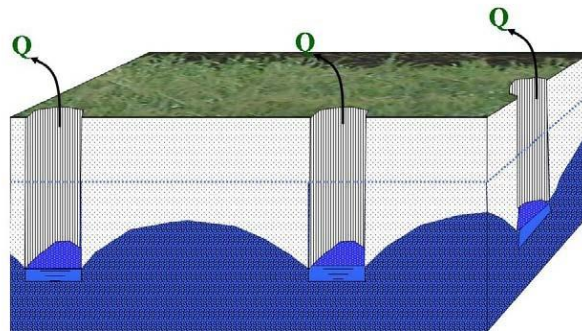


Fig.2 : Drainage vertical

1.6.1. Le schéma général d'un réseau de drainage

Un système de drainage est composé d'un réseau de drains permettant de rabattre la nappe à un niveau inférieur à celui de la profondeur d'enracinement.

L'écoulement des eaux venant de la parcelle drainée s'effectue dans un émissaire par l'intermédiaire d'un exutoire.

L'émissaire est une voie d'eau naturelle aménagée ou non. Le débouché d'un système de drainage est le point de raccordement entre ce système et l'exutoire correspondant. Il est généralement constitué d'une bouche de décharge en béton préfabriqué. Le raccordement entre le système de drainage et le débouché est obligatoire. (Figure 3).

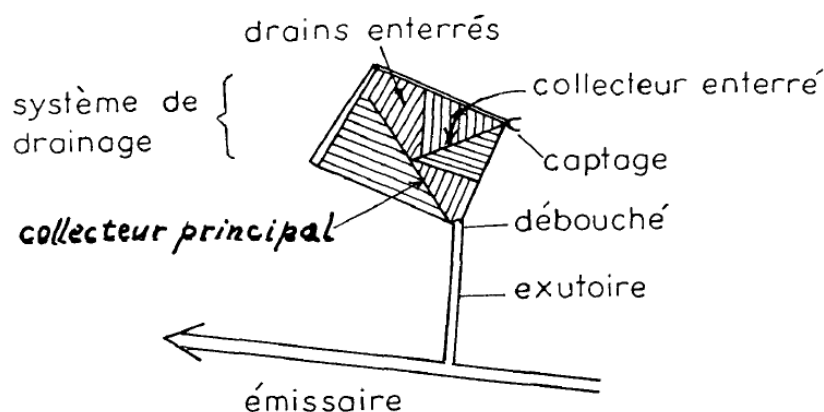


Fig.3 : Schéma général d'un système de drainage

1.6.2. Composantes principal d'un réseau de drainage

Les composantes principales d'un réseau de drainage sont les suivantes :

1. Drains latéraux ;
2. Collecteurs ;
3. Structures complémentaires

On distingue trois types de réseau dont la disposition des drains dans l'espace est faite comme suit (Fig.4) :

- Réseau naturel ;
- Réseau en arête de poisson ;
- Réseau parallèle.

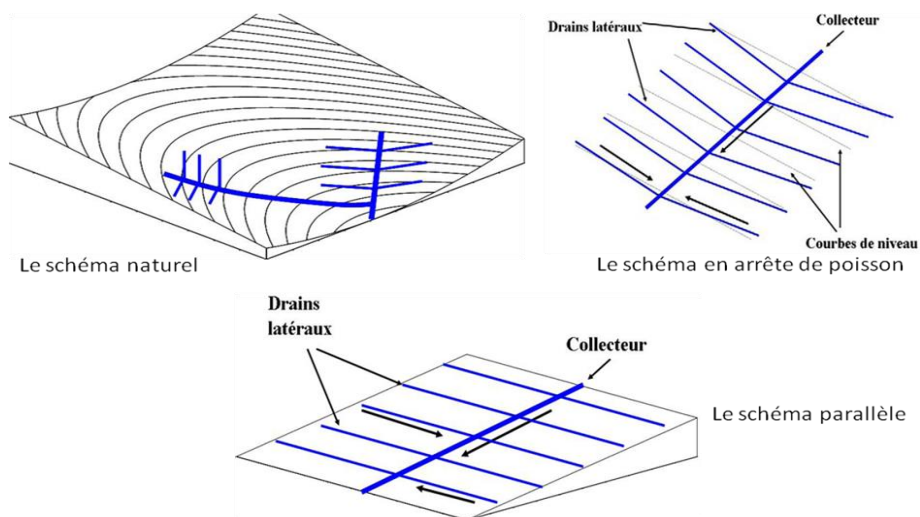


Fig.4 : Les différents types de réseaux

Le choix du type de réseau, dépend des conditions de terrain si on a une large plaine plane avec des parcelles rectangulaires on utilise un réseau parallèle, et si le terrain est ondulé le réseau en arête de poisson ou naturel est choisi.

1.7. Les origines de l'excès d'eau

L'eau en excès dans un sol peut provenir des différentes sources. Il est important d'en connaître l'origine avec précision, afin de pouvoir choisir un remède efficace contre ces excès.

1.7.1. Les eaux extérieures

Les apports extérieurs sont des arrivées d'eau autre que l'apport pluvial direct :

1. Le ruissellement
2. L'installation d'une nappe permanente
3. Les autres eaux souterraines, appelées mouillères ou sources.
4. L'irrigation

A) Ruissellement superficiel

Les eaux provenant d'un bassin versant situé en amont de la zone à assainir peuvent déborder des lits existants des oueds, ou carrément provoquer une inondation par ruissellement sur le terrain. Ces inondations seront concentrées dans les vallées, plaines ou dépressions au pied d'une montagne.

Donc il faut prendre en compte le ruissellement superficiel dans un projet de drainage. Pour cela il est important de connaître l'hydrologie d'une région, notamment les apports des crues des oueds qui parcourent la zone, pour trouver les endroits susceptibles d'être inondés. Un projet de drainage peut comporter dans ce cas des travaux de déviation, comme un endiguement ou un canal de ceinture autour de la zone à assainir (Fig.5).

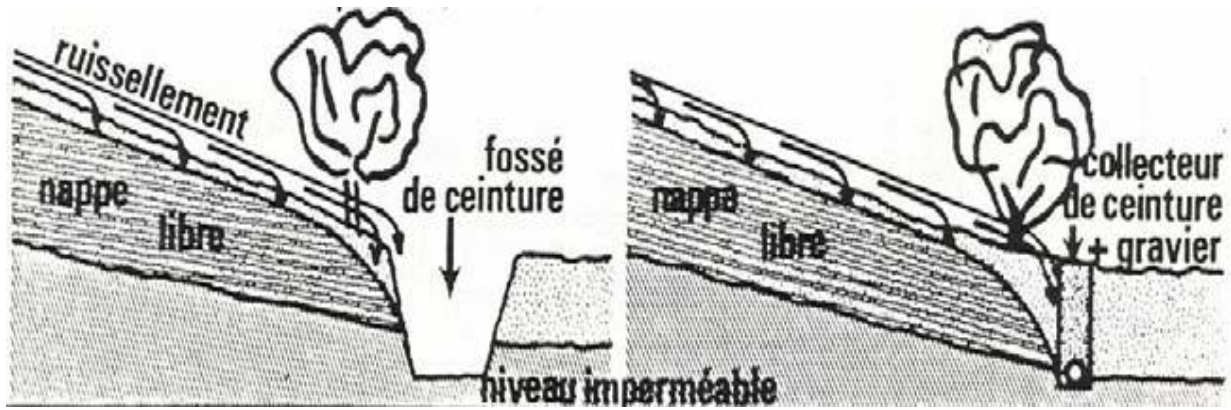


Fig.5 : Le ruissellement superficiel

B) L'installation d'une nappe permanente

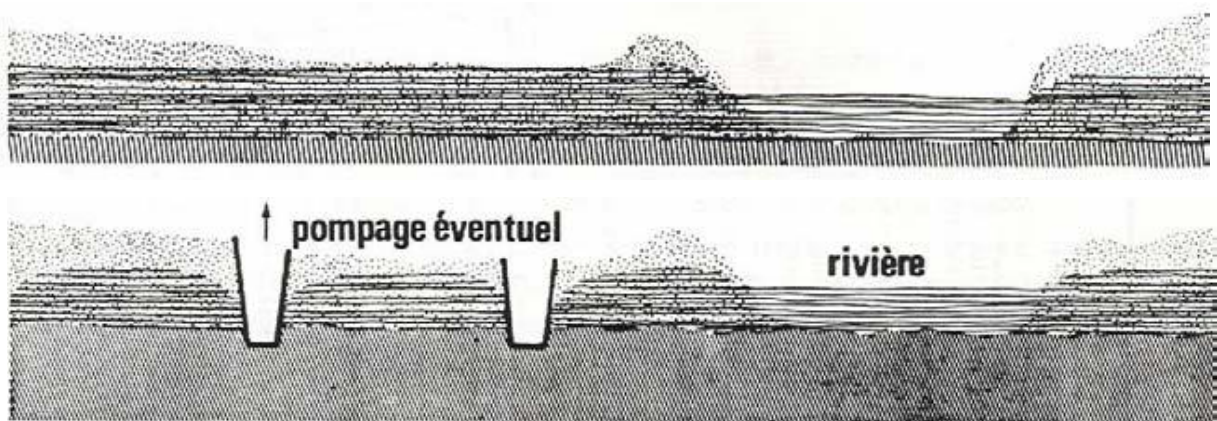


Fig.6 : Nappe permanente

C) Ecoulement souterrain

Dans les régions plus accidentées, on rencontre souvent une nappe souterraine plus an moins profonde qui s'écoule vers les parties basses du terrain. Cette nappe peut constituer un apport important au niveau de la zone à drainer par suintement au par affleurement local en forme des sources (fig.7)

La localisation et le débit de ces affleurements est assez difficile à déterminer, vu qu'elles dépendent des conditions hydrogéologiques, la figure suivante montre les situations dans lesquelles, on peut trouver les zones humides le long de la pente.

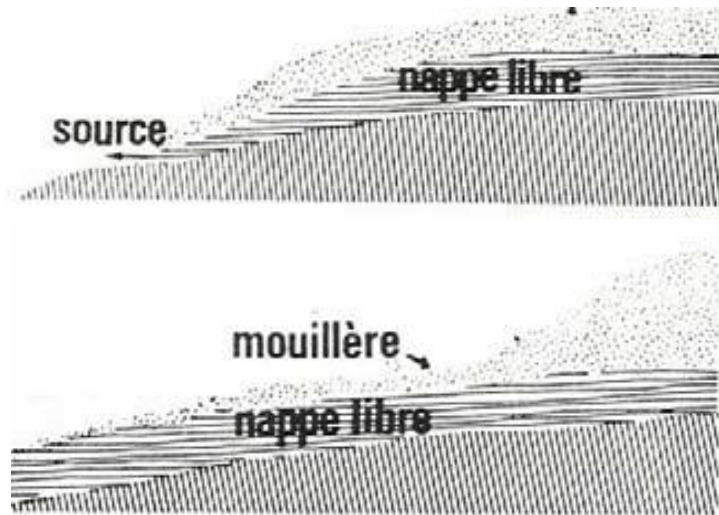


Fig.7 : Affleurement de couche imperméable, ruissellement, rupture

D) Irrigation

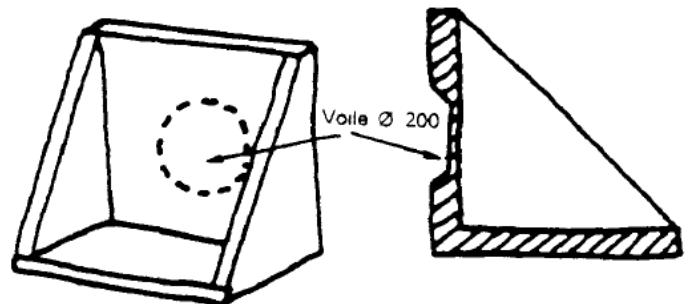
L'apport artificiel des eaux sous forme d'irrigation peut perturber l'équilibre naturel qui existe dans une région. Cette irrigation risque de faire remonter la nappe jusqu'à un niveau inacceptable pour les plantes. Il s'agit des cas où l'irrigation est surabondante par négligence ou au non-respect des doses pratiques.

Normalement, chaque projet d'irrigation doit être accompagné d'un projet de drainage ; ou au moins d'une étude de la perméabilité du sous-sol, afin de prévoir la remontée de la nappe et l'évolution du taux de sel.

Cette énumération des causes de l'humidité excessive met en évidence la nécessité d'examiner les conditions climatiques, pédagogiques et hydrogéologiques d'une région à drainer, avant de réaliser un projet.

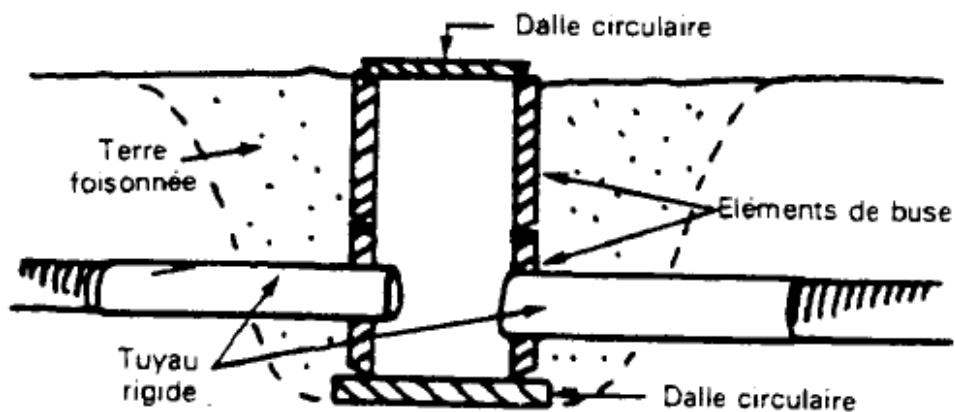
En principe les eaux extérieures ne doivent pas être recueillies par les drains. Elles doivent être captées avec précaution pour éviter d'envoyer le réseau de drainage proprement dit. Il existe plusieurs techniques de captage :

1. Les collecteurs de ceinture, enterrés (drain ou collecteurs perforés) ou non (fossés), dont le rôle est de protéger également le réseau de drainage ; (On placera les collecteurs de ceinture à quelques mètres en parallèle avec les obstacles) ;
2. Les avaloirs pour récupérer les eaux de ruissellement concentrées (Ils sont généralement situés sur le réseau principal des collecteurs et sont constitués de boîte de jonction, regard de visite et bouche de décharge (Fig.8).



Boîte de jonction

Bouche de décharge ordinaire



Regard de visite

Fig.8 : Techniques de captage

1.7.2. Les eaux intérieures

Les eaux intérieures sont les apports pluviaux directs. L'excès d'eau dû à une accumulation de la pluie se manifeste sur les sols qui opposent une résistance à l'infiltration profonde de l'eau. Cette résistance peut avoir plusieurs causes qui se combinent :

1. Existence d'un horizon imperméable à 2 ou 3 m de profondeur bloquant l'infiltration et créant une nappe perchée ;
2. Existence d'un horizon peu perméable sous la couche labourée rendant l'infiltration très lente et créant une nappe perchée ;
3. Problèmes de surface des sols battants ou à semelle de labour : l'eau stagne sans s'écouler.

1.8. Les techniques de drainage

1.8.1. Description des techniques de drainage habituelles

L'objectif d'un réseau d'une technique de drainage est de permettre l'évacuation d'un certain volume d'eau à un certain temps d'une zone de sol bien délimitée il n'y a que deux types de solutions :

- Améliorer l'aptitude naturelle du sol à évacuer l'eau qu'il contient ;
- Créer une "aptitude" artificielle, on peut également tenter de réaliser une combinaison optimum entre ces deux cas.

1.8.1.1 Amélioration du drainage naturel

La technique classique fait appel au sous-solage. Il permet de briser les horizons de classement, de remonter le sol sur une certaine profondeur et d'accroître ainsi son aptitude au drainage naturel.

Le drainage par sous-solage se fait évidemment en période sèche sur un terrain sec, avec une sous-soleuse où il rend le sol le plus perméable possible.

Le schéma d'un drainage par sous-solage comporte un réseau de lignes écartées d'un à deux mètres en combinaison avec des tuyaux souterrains, placés à une profondeur de 0,20 à 0,25 m plus bas que le sous-solage, perpendiculairement aux lignes (fig.9).

On peut associer à cette technique l'apport d'amendement chimique. Le sous solage est une opération qui se répète tous les trois à cinq ans, selon la nature des terres et des cultures.

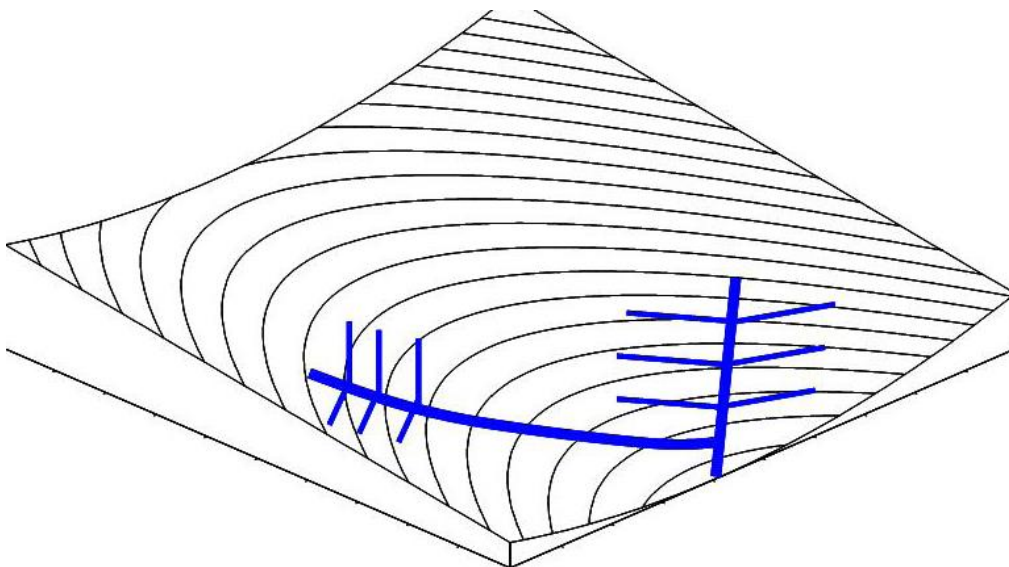


Fig.9 : Le schéma naturel

1.8.1.2. Amélioration artificielle

1.8.1.2.1. Drainage par fossé

A) Fossé ciel ouvert

Il s'agit d'une technique très ancienne qui consiste à creuser (dans le sol à intervalle régulier quelques dizaines de mètres le plus souvent) des fossés de

profondeur pouvant aller jusqu'à 2m ou plus et de largeur comprise entre 0,3 et 0,5 m. Ces fossés ont deux fonctions :

- Intercepter le ruissellement superficiel et évacuer ainsi un excès d'eau de surface ;
- Créer un gradient hydraulique et ainsi provoquer un écoulement souterrain depuis le sol vers le fossé drainé. Le sol évacue alors un certain volume d'eau plus ou moins rapidement (fig.6) (s'il s'agit d'évacuer uniquement les eaux superficielles, les fossés seront peu larges et peu profonds et très écartés, et s'il faut au même temps, recueillir les eaux souterraines, on dispose des fossés très profonds et très rapprochés). L'eau drainé par le fossé doit être alors acheminée vers un exutoire approprié, le plus souvent une voie naturelle d'écoulement (oued).

La technique du drainage par fossé présente deux gros avantages :

- Simplicité relative de mise en œuvre ;
- Investissement peu élevé.

Elle est donc largement répandue dans les zones d'agriculture traditionnelle.

Les inconvénients sont également très importants :

- Les fossés nécessitent un entretien annuel si on désire qu'ils gardent leur capacité d'écoulement.

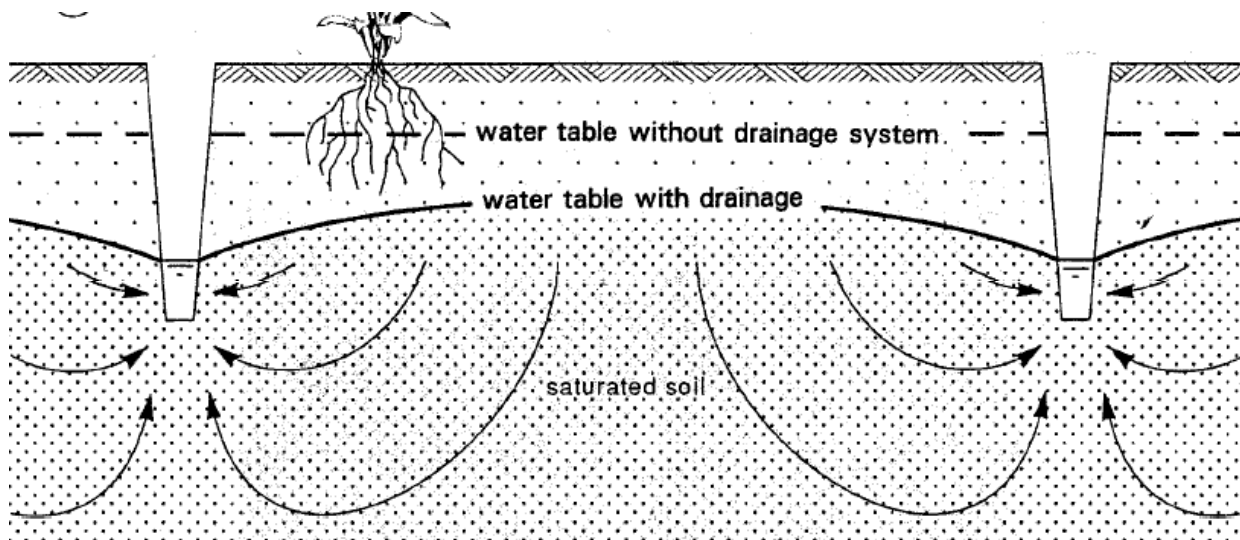


Fig.10 : Drainage par fossés

B) les fossés remblayés

La technique consiste à placer au fond du fossé un matériau filtrant (gravier par exemple (fig.11), puis à remblayer la tranchée avec le sol original.

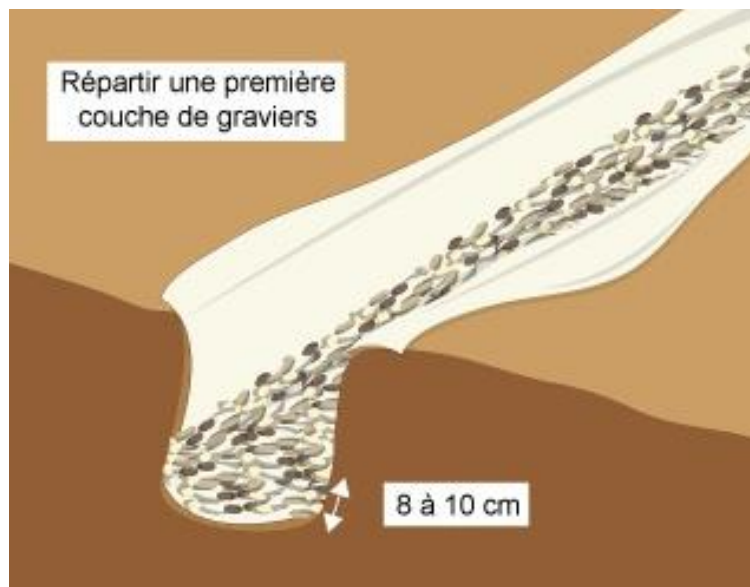


Fig.11 : Les fossés remblayés

Ce type de système contourne les inconvénients des fossés à ciel ouvert :

- Perte de terrain ;
- Entretien.

Par contre ils n'interceptent plus le ruissèlement superficiel, et surtout leur durée de vie est très aléatoire par suite du risque de colmatage rapide du matériau filtrant par des particules de sol fin.

Le drainage par fossé n'étant pas toujours satisfaisant, donc une autre technique a été mis au point.

1.8.1.2.2. Drainage par tuyaux enterrés

Pour éviter tous les problèmes évoqués ci-avant, le fossé ou le matériau filtrant a été remplacé par un tuyau enterré, ce tuyau est pourvu d'ouvertures (fig.12), celles-ci ont pour fonction de laisser entrer l'eau du terrain, cette eau est évacuée en écoulement à surface libre par le tuyau auquel on a donné une pente, vers un collecteur.

Ce collecteur peut lui-même être un tuyau ou un fossé ou une voie naturelle d'écoulement. Toute l'eau drainée est ainsi acheminée vers un exutoire approprié (fig.13).

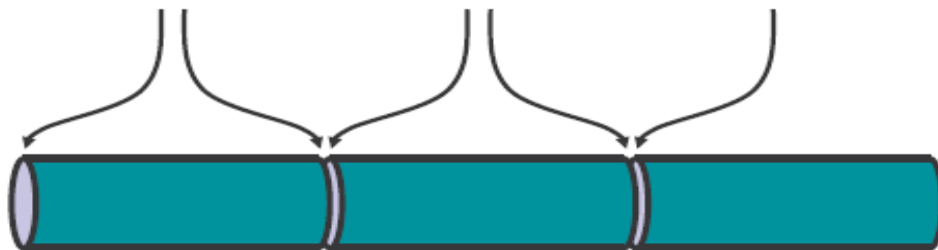


Fig.12 : Entrée d'eau dans des drains en ciment ou en terre cuite

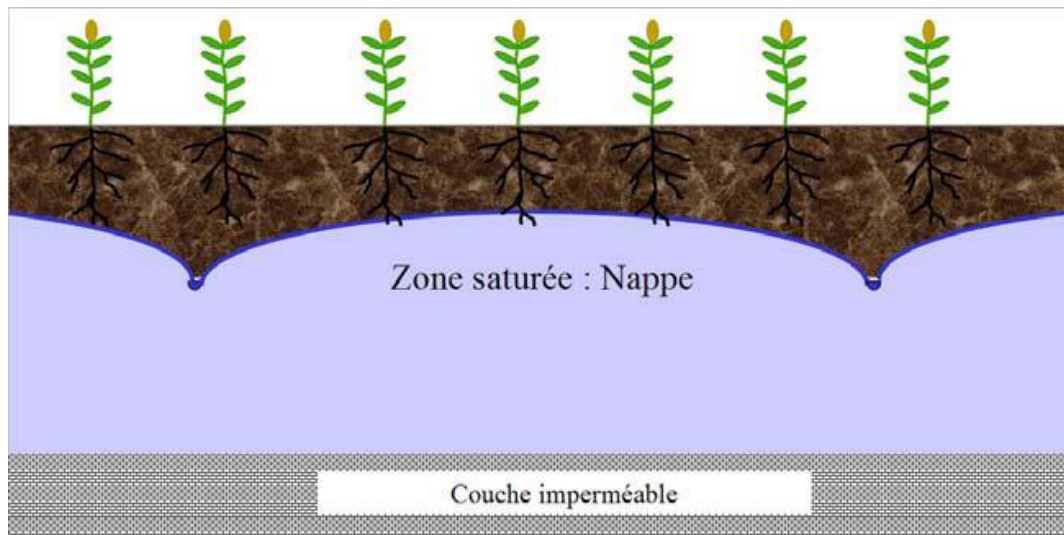


Fig.13 : Drainage par tuyaux enterrés

La file de tuyaux peuvent être écartée de quelques mètres à plusieurs centaines de m. La profondeur d'installation peut varier entre 1 et 3 m en général. Dans le drainage profond, on peut mettre les lignes de tuyaux (drains) à une plus grande distance les unes des autres et par suite ouvrir moins de tranchées et dépenser moins de tuyaux (Fig.14).



Fig.14 : Raccordement drain - collecteur

Le choix des drains est surtout fonction du coût et de la disponibilité, si les drains en PVC sont disponibles (Fig.15), ces drains présentent certains avantages importants :

1. Faible poids (coût de transport) ;
2. Disponible en grande longueur ;
3. Bien adapté à l'installation machinale.



Fig.15 : Les drains en PVC

Exemple

L'exemple d'un drainage exécuté dans un terrain argileux et dans lequel les drains sont placés à 1,05 m de profondeur et 9 m d'écartement et un drainage comparatif exécuté en plaçant les drains à la profondeur de 0,90 m et à l'écartement de 5 m.

$$100' \frac{100}{9} = 1100 \text{ m de tuyaux (1ha = } 10^4 \text{ m}^2 \text{)}$$

Et dans le second cas :

$$100' \frac{100}{5} = 2000 \text{ m de tuyaux}$$

Donc importante économie sur l'achat et le transport des drains (Remarque : Le drainage profond est plus économique qu'un drainage superficiel).

A) Puits de drainage

Il s'agit d'une technique utilisable dans un cas bien particulier, tel que schématisé à la figure 16.

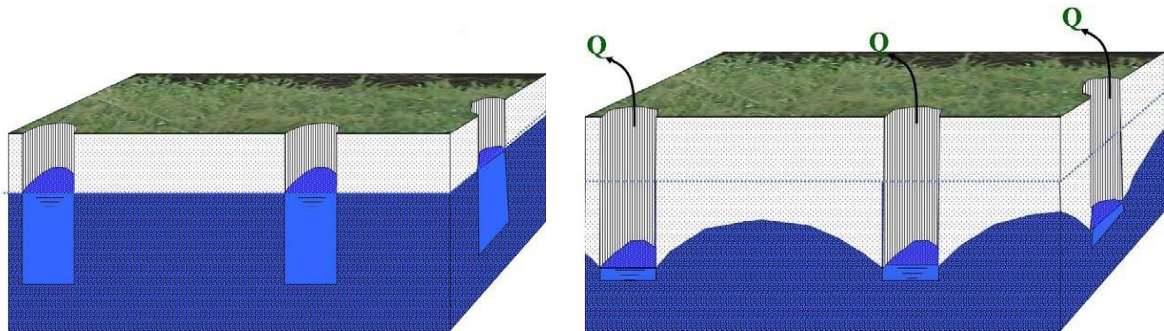


Fig.16 : Drainage vertical.

Il s'agit tout de même d'un cas relativement rare et cette technique n'est d'habitude utilisée que s'il n'existe pas d'émissaire "assez bas" pour recevoir les eaux de drainage.

Dans cas, on effectue également le prélèvement des excès d'eau par pompage à partir de puits verticaux. On parlera alors de drainage vertical.

B) Drainage taupe

Cette technique consiste à façonner dans le sol des galeries moulées par un engin appelé charrue-taupe. L'organe de moulage est constitué par un obus métallique (f de 40 à 100 mm) comme illustré à la figure 17.

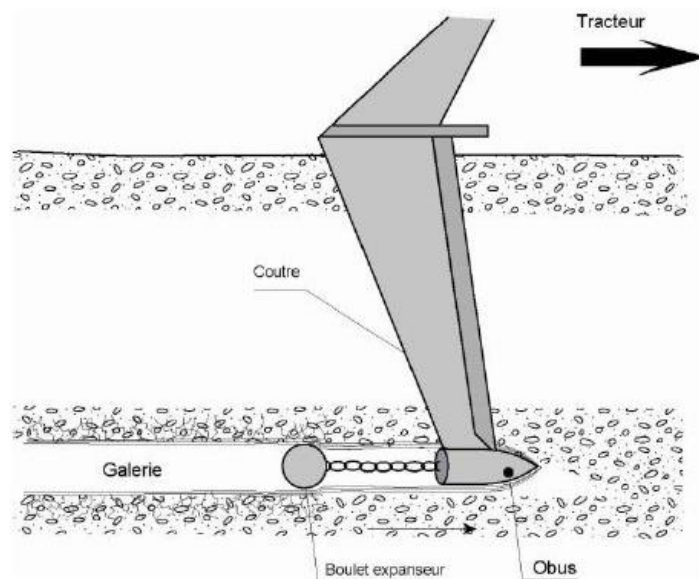


Fig.17 : Drainage Taupe

L'utilisation de cette technique n'est possible évidemment qu'en terrain suffisamment cohérent et humide (sols argileux).

La profondeur d'installation des galeries est très limitée, à cause des forces nécessaires, la durée de vie des galeries est de 74 ans (durée de vie maximum).

Ce type de drainage est moins cher que le drainage classique par tuyaux enterrés (de 5 à 10 fois moins cher).

1.9. Quelques informations sur le problème du drainage en Algérie

Le problème du drainage se pose en Algérie avec acuité dans certaines régions.

Dans les zones arides ou désertiques du sud, dans les palmeraies, la lutte contre la salinisation des sols par suite de la remontée des nappes phréatiques est permanente depuis la mise en culture de ces zones.

Les réseaux de drainage (presque toujours par fossé) y sont plus ou moins bien entretenus et fonctionnelles suivant les régions.

Dans le nord, il existe de vastes périmètres irrigués, installés très souvent dans des dépressions, des plaines alluviales à faible drainage naturel.

Ces périmètres sont soit dépourvus de réseaux de drainage, soit équipés de vieux réseaux de fossés non ou mal entretenus et peu fonctionnels.

Ces périmètres souffrent beaucoup de ce mauvais contrôle des nappes. On peut citer par exemple : le périmètre de Bounamoussa (près d'Annaba) qui souffre d'un engorgement des sols notamment à cause de la pluviométrie importante dans la région.

Le périmètre de la mina près de Relizane qui souffre de la salinisation des sols à cause de la remontée des nappes suite à la non maîtrise des volumes d'eau d'irrigation apportés. Il est évident qu'en Algérie le drainage est une technique qui doit être associée à l'irrigation l'une ne va pas sans l'autre.

Chapitre II : Les bases de calcul des réseaux de drainage

2. Etude à réaliser pour la conception d'un réseau de drainage

2.1. Les critères de dimensionnement en matière du drainage

2.1.1. Quelles dimensions ?

Sur le plan des dimensions d'un réseau de drainage, on peut distinguer deux niveaux :

A/ les dimensions d'installation du réseau sont :

- La profondeur de placement des drains ;
- L'écartement entre les drains parallèles : notons que cet écart est directement lié à la profondeur, l'écart est la dimension la plus importante sur les plans technique et économiques ;
- La pente des drains ou fossés.

B/ Les dimensions des équipements sont :

- Les diamètres des drains (largeurs pour tranchée ou fossé) ;
- La longueur des files de drains ;
- Dimensions des collecteurs ;
- Dimensions des enrobages de drain ;
- Dimensions des équipements annexes, (Regards, bouches, chutes...).

2.1.2. Quels critères ?

Ce sont les données et les informations qui permettent de choisir, fixer ou calculer plus au moins rigoureusement les dimensions évoquées ci-avant. Nous allons les énumérer :

1. Les critères agronomiques (durée de submersion admissible, hauteur, optimale.) ;
2. Caractéristiques des sols (conductivité, porosité, substratum imperméable...) ;
3. Régime d'évacuation des eaux : (permanent, variable...) ;

4. Volume d'eau à évacuer : (pluviométrie, irrigation, lessivage, bilan hydrique...);
5. Caractéristiques des terrains : (dimensions des parcelles, pentes, topographies.)

2.2. Données agronomiques

Dans la partie « Inconvénients des sols humides » nous avons montré quelles sont les conséquences d'un sol trop humide sur la croissance et la production des plantes.

Le drainage a pour but d'éviter les inondations, ou d'abaisser la nappe à un niveau non nuisible. Dans ce chapitre on essaye de quantifier à l'aide des résultats des nombreuses expériences partout dans le monde, les pertes de production et les exigences spécifiques des cultures vis-à-vis de la profondeur de la nappe et de la durée d'inondation (submersion); et leurs conséquences pour le drainage.

2.2.1. Hauteur optimale de la nappe

Rappelons qu'une nappe est une zone de sol dans laquelle la totalité de la porosité est occupée par de l'eau. Le taux de saturation est donc de 100%, au-dessus de cette zone saturée, on trouve une zone de sol dans laquelle une fraction de la porosité est occupée par de l'air, c'est la fraction non saturée du sol. La grandeur respective des deux zones de sol est très variable et il y a modification en fonction des apports, des exportations, des mouvements latéraux etc.

Le niveau atteint par la nappe peut donc fluctuer plus ou moins fortement c'est pour cette raison on parle de profondeur optimale. (Remarque : lorsque nous

parlons de profondeur nous comprenons distance verticale entre la surface du sol et le toit de la nappe).

D'une part nous avons vu qu'une nappe, trop proche de la surface, peut créer des conditions asphyxiantes néfastes à la croissance normale des plantes. D'autre part, on peut imaginer qu'une nappe trop profonde ne participera pas à l'alimentation en eau des plantes et aura ainsi, un effet dépressif sur le rendement.

On peut donc concevoir, qu'entre trop profonde et pas assez profonde, il existe une profondeur optimum de la nappe, de nombreuses expériences ont été réalisés pour essayer de définir ce niveau, mais ce dernier reste fonction de :

- Type de culture est le stade de développement ;
- Le type de sol ;
- Les conditions climatiques annuelles (année sèche ou pas, vent...) ;
- Les façons culturales.

La figure 18 donne un exemple de résultat que l'on peut obtenir, on constate ainsi qu'il existe en moyenne deux types de cultures.

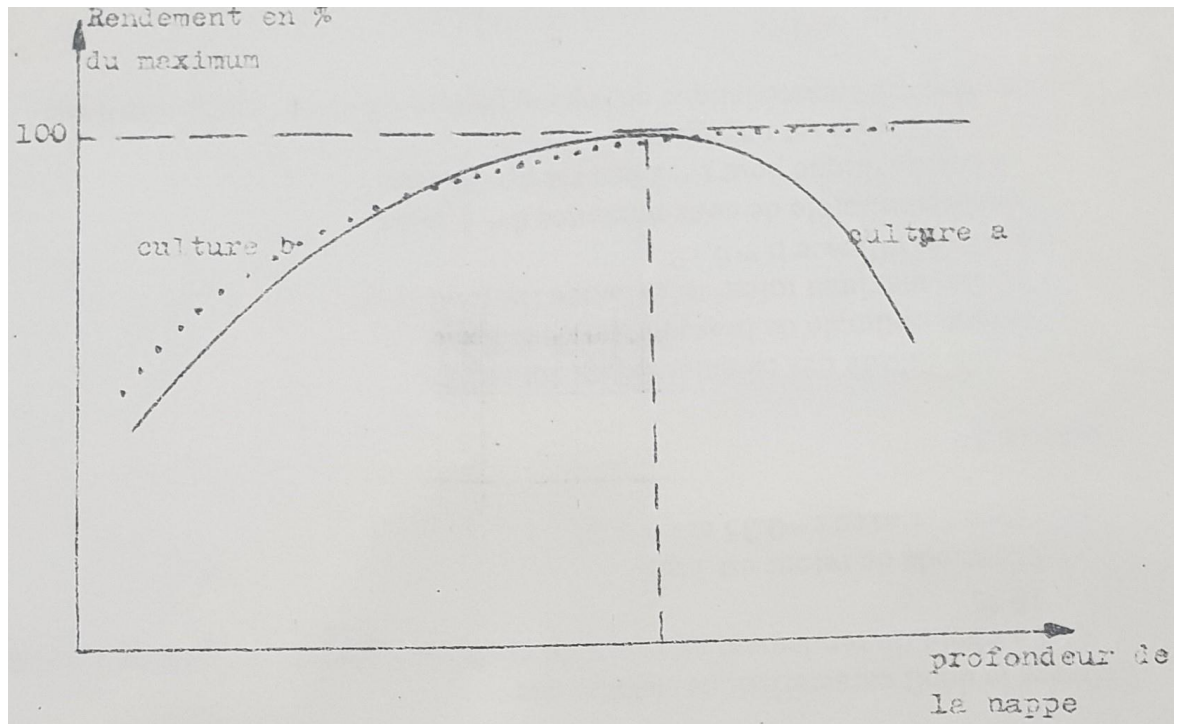


Fig.18 : Types de relations entre le rendement et la profondeur de la nappe

- Le type (a) qui présente un optimum prononcé, (c à d se sont des cultures à enracinement superficiel, (plus la profondeur de la nappe augmente et plus le rendement de ces cultures diminue) et les plantes souffrent d'une sécheresse ;
- Le type (b) qui a besoin d'une profondeur minimum et qui ne souffre pas de sécheresse enracinement profond.

La figure 19 donne un autre exemple de résultat pour une même culture sur divers types de sol.

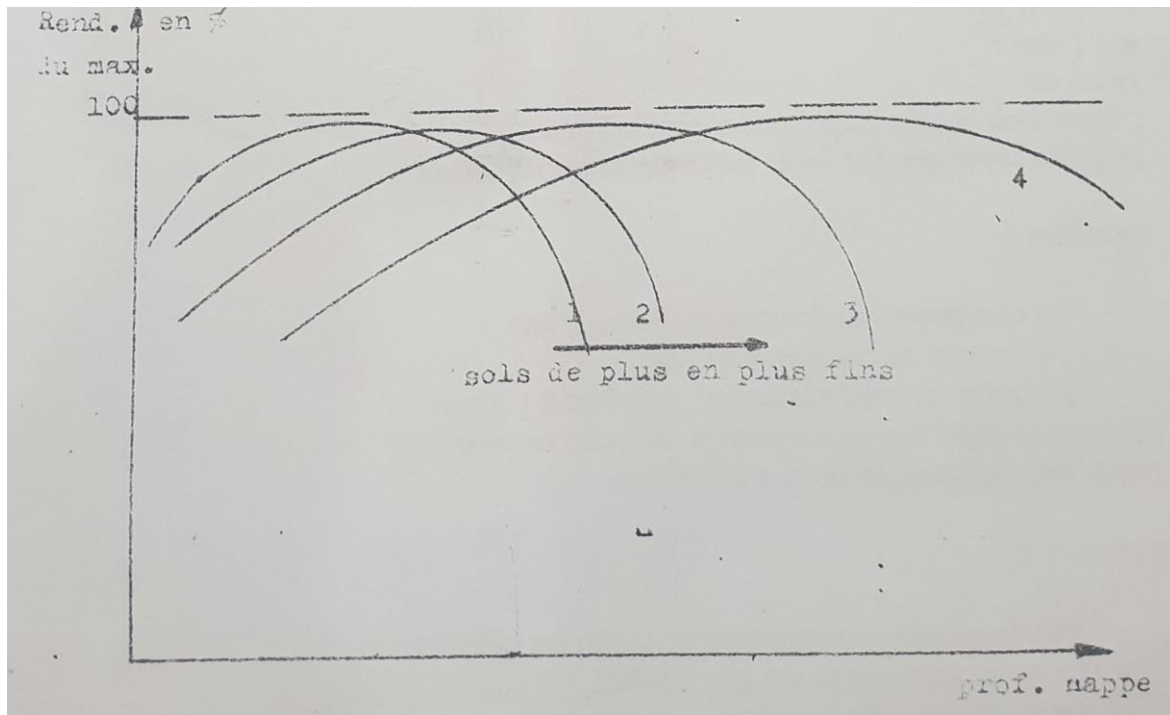


Fig.19 : Types de relations entre le rendement et la profondeur de la nappe pour une même culture sur divers sols

2.2.2. La durée de submersion

En pratique, le niveau d'eau optimal est difficile à maintenir sans aucune fluctuation, une pluie forte de quelques jours fait remonter la nappe temporairement à un niveau supérieur à l'optimum cette remontée cause des chutes de rendements importantes, qui dépendent d'ailleurs :

- Du moment de la submersion ;
- Du type de culture ;
- Et de la durée de submersion.

Les périodes d'inondations qui provoquent des pertes, sont de 24 à 35 heures.

Les données existantes ont été regroupées par SALAMIN dans le tableau 1 et qui donne pour plusieurs cultures les dommages subis par les plantes (en pourcent de la récolte optimale) pendant la saison, en fonction d'une durée de submersion respectivement de 3,7, 11 et 15 jours.

Tableau 1 : Dommages subis par les cultures (en % de la récolte optimale), en cas de submersion de 3,7,11 et 15 jours

MOIS	JANV.			FEVR.			MARS			AVRIL			MAY			JUIN			JUILLET			AOUT			SEPT.			OCTOBRE			NOVEMBRE			DÉCEMBRE														
	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15	3	7	11	15								
1) Fourrages perennes	-	-	5	10	-	-	5	10	-	10	20	30	10	25	40	60	10	30	50	100	10	40	70	100	10	40	70	100	10	30	50	80	10	30	50	70	-	10	20	30	-	5	10	-	-	5	10	-
2) Pâturage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	10	20	30	-	15	30	50	-	20	30	50	-	20	30	50	-	10	20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
3) Prairie	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	10	20	30	-	15	30	50	-	20	30	50	-	20	30	50	-	10	20	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
4) Betteraves	-	-	-	-	-	-	-	-	10	50	100	100	10	10	40	100	10	50	90	100	10	40	90	100	10	40	90	100	10	40	90	100	10	40	90	100	10	30	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5) Pommes de terre	-	-	-	-	-	-	-	-	30	80	100	100	30	80	100	100	40	90	100	100	50	100	100	100	50	100	100	100	50	100	100	100	20	40	60	80	-	-	-	-	-	-	-	-				
6) Tournesol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	40	80	10	30	60	100	10	40	80	100	10	40	60	80	-	10	30	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
7) Chanvre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	40	60	100	20	40	75	100	10	40	60	80	10	30	50	70	-	10	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
8) Céréales d'hiver	-	5	10	15	-	5	10	20	5	15	30	50	10	25	40	70	20	40	70	100	20	50	80	100	-	-	40	70	-	-	-	-	-	-	5	10	5	10	20	-	5	10	20	-				
9) Céréales d'été	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	40	100	15	40	75	100	15	50	75	100	20	50	75	100	-	-	10	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
10) Maïs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	80	100	100	10	50	80	100	10	50	75	100	-	-	10	50	80	-	10	40	60	-	10	20	30	-	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-

Ce tableau montre nettement que les pertes subies dépendent de 3 facteurs :

- a. **La culture** : par exemple les pertes pour la prairie ne dépassent pas les 50% pour 15 jours en (mai, juin, juillet), tandis que les betteraves subissent déjà une perte de 100% en 11 jours en mars).
- b. **La durée de submersion** : une perte de 80% est subie par le tournesol en 11 jours, et seulement de 40% de perte en 7 jours.
- c. **Le stade de culture** : par exemple le maïs aura une perte de 100% en Avril (germination) et de 30% en septembre (vers la récolte).

Pour le calcul d'un réseau de drainage, où se fixera un dommage toléré basé sur des critères économique (par exemple 20%).

Avec le tableau de SALAMIN on déduit la "durée admissible d'inondation" θ , qui provoque cette perte fixée (20 %). En termes de drainage, cela veut dire qu'une pluie doit être évacuée dans un délai de θ jours après d'être tombée.

Exemple : Si on pose une perte maximale de 20%, la durée admissible θ sera de 3 jours pour les céréales (en mai) et de 7 jours pour la prairie (en juin).

2.3. Les caractéristiques pédologiques

En matière de dimensionnement d'un réseau de drainage trois caractéristiques sont indispensable :

1. La conductivité hydraulique saturée ;
2. La porosité de drainage ou porosité efficace ;
3. La profondeur de la couche imperméable ou peu perméable.

2.3.1. La conductivité hydraulique (k)

2.3.1.1. Rappels

Soit une colonne de sol de section S et de longueur (fig.20).

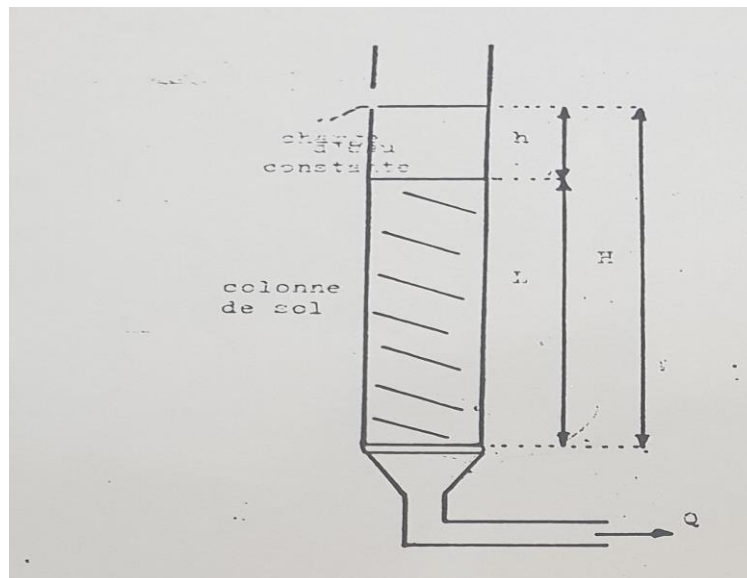


Fig.20 : Relation type Darcy

Plaçons cette colonne verticalement sur une plaque poreuse permettant de récupérer et mesurer l'écoulement à travers la colonne. Appliquons une charge

d'eau h de hauteur constante au sommet de cette colonne, laissons s'établir un régime permanent. En appliquant l'équation de Darcy :

$$Q = KSI \frac{dh}{dl} = \frac{q \cdot \delta}{S}$$

l: pente hydraulique $\frac{H}{L}$

Débit spécifique $q = \frac{Q}{S} = ks \frac{H}{L}$

$$Q = K \cdot \frac{DH}{L} = k \cdot \frac{H}{L} \quad q = k \frac{H}{L}$$

Le facteur k a les dimensions d'une vitesse, il s'exprimera le plus souvent en m/jour, cm/sec ; mm/h ou un mm/jour. Pour les problèmes de drainage seule la conductivité à saturation nous intéresse.

En matière de drainage, un sol ayant un facteur k < 0,1 m/jour est considéré pratiquement imperméable et ne pouvant difficilement être équipé d'un réseau de drainage efficace et économique.

2.3.1.2. Importance du facteur et problème de la mesure

Un peu plus loin nous étudierons l'hydraulique des nappes en drainage. Nous mettons en évidence quelques équations qui permettent de dimensionner l'écartement entre les drains. On pourra alors constater l'importance fondamentale du facteur k dans ces équations. Imaginons un terrain de 1 hectare soit 10.0000 m², l'épaisseur du sol qui peut être concernée par l'écoulement vers un réseau de drainage sera souvent de plusieurs mètres, on peut ainsi estimer le volume de terre concerné à 20 ou 30.000 m³ ou plus. Or la plupart des méthodes de mesure de k n'échantillonnent que de très faibles volumes de terrain (pour des raisons essentiellement économique) et dans ces conditions, il est très difficile de disposer de mesures représentatives.

2.3.1.3. Méthodes de mesure

Il existe plusieurs méthodes de mesure :

1. Des méthodes de laboratoire ;
2. Des méthodes corrélatives ;
3. Des méthodes (in situ) de terrain.

A/ méthode de laboratoire : Elle consiste à prélever des échantillons de sol non remanié à réaliser sur ces échantillons des mesures celles décrites à la figure 13. (Cela ne vaut pas la peine de s'étendre sur ces types de mesure parce que :

- Il est pratiquement impossible de prélever des échantillons que l'on peut qualifier de non remanié ;
- Les volumes de sol, échantillonnés de cette façon ne représentent que quelques dm³ c'est-à-dire des volumes insignifiants par rapport au volume total de sol qui sera concerné par l'écoulement vers un réseau de drainage.

B/ Méthodes corrélatives : On peut trouver des équations empiriques qui ont pour objet des corrélations entre les valeurs de k et la composition textural d'un sol. En pratique seuls les mesures de terrain seront dignes d'intérêt :

Quelques valeurs de référence sont données à titre d'exemple :

1. Texture très fine (argileuse) : $k < 0,1$ m/jour
2. Texture fine (argilo-limoneuse, limono-argileuse, argilo-sableuse) : $0,1 < k < 0,3$ m/jour.
3. Texture moyenne (limoneuse, sablo-limoneuse) : $0,3 < k < 0,6$ m/jour

4. Texture grossière (limono-sableuse, sablo-limoneuse) : $0,6 < k < 1$ m/jour

5. Texture très grossière (sableuse) : $k > 1$ m/jour

En pratique seuls les mesures de terrain seront dignes d'intérêt.

C/ Mesures in-situ : on peut distinguer 2 types de mesures :

1. Les mesures par trou de sondage (trou à tarière) ;

2. Les mesures réalisées sur système de drainage expérimental

A/ La méthode du trou tarière : C'est la méthode la plus utilisée pour ce qui concerne les problèmes de drainage.

Elle consiste à réaliser un trou à la tarière dans le sol jusqu'à la profondeur voulue sous la nappe (H). Idéalement, il faut laisser durant un à deux jour l'équilibre se réaliser, puis on vide le trou sur une certaine profondeur y et on mesure ensuite la vitesse de remplissage du trou: Dy / Dt .

Le facteur k peut alors être exprimé de la manière suivante :

$$k = c \cdot \frac{Dy}{Dt}$$

Le facteur "c" dépend des caractéristiques géométriques du trou, de la profondeur de l'horizon imperméable (s) de l'hydraulique de la nappe.

Il s'agit de la méthode la mieux adaptée aux problèmes de drainage pour des raisons :

1. Économique (temps de mesure...);
2. Matériel (tarière et chronomètre);
3. De facilité ;
4. De fiabilité et de précision.

Il existe d'autres méthodes pour le calcul de la conductivité Hydraulique (k) parmi ces méthodes :

1. La méthode du piézomètre ;
2. La méthode du trou à tarière inversé ;
3. La méthode de mesure sur drains pilotes (expérimentaux).

2.3.2. La porosité efficaces ou porosité de drainage

On sait que le sol est constitué d'une matrice solide composée de particules qui s'agencent entre elles de diverses façons. De part cette agencement, elles laissent entre elles des vides, le volume occupé par ces vides relativement au volume total est appelé « porosité » d'où :

$$\text{Porosité totale} = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} \times 100 \text{ (en \%)}$$

$$= \frac{\text{volume total} - \text{volume solide}}{\text{Volume total}} \times 100$$

Cette porosité peut être occupé à 100% par de l'eau, ou dit alors que le taux de saturation est de 100%. Si ce taux est inférieur à 100% la porosité est partiellement occupée par de l'air.

Dans le cas des problèmes de drainage, ce n'est pas la porosité totale qui intéresse à priori mais, Seulement une fraction de cette porosité on l'appelle porosité de drainage ou efficace.

Qu'est-ce que cette porosité efficace ?

- Soit un sol équipé d'un réseau de drainage. Supposons que ce sol soit saturé suite à un apport brutal et "volumineux" d'eau ;
- Le sol commence alors à se drainer (l'eau s'écoule vers les drains), on constate alors que seule une fraction de la porosité « lâche" son eau, seule une fraction participe pratiquement à l'écoulement vers les drains d'où l'intérêt de connaître cette fraction on la dénomme par :

$$M = \frac{\text{volume des pores remplie d'air après drainage}}{\text{Volume total de sol}}$$

Au laboratoire: cela consiste à prendre des échantillons (non remaniés) du sol, les saturés, les peser, les laisser se drainer durant 24 heures (en les protégeant contre l'évaporation), mesurer le poids après 24 heures et en déduire la porosité efficace de la manière suivante:

$$M = \frac{\text{poids saturation} - \text{poids à capacité de rétention}}{\text{Volume total}} \times 100$$

2-4. Caractéristiques hydrologiques

2.4.1. Les volumes d'eau en excès

La nécessité du drainage artificiel provient :

1. D'un excès d'eau que le sol ne peut évacuer naturellement ;
2. Déterminer l'origine de cet excès d'eau dans la zone étudiée ;
3. Ensuite chiffrer ces apports.

2.4.2. Les origines possibles d'un excès d'eau

En matière de drainage on peut distinguer quatre sources possibles d'excès d'eau dans une zone donnée :

1. La pluviométrie ;
2. Les irrigations et les doses de lessivage ;
3. Les apports latéraux de surface (ruissellement) et débordements des oueds ;
4. Les apports latéraux souterrain (mouvement de nappes vers les dépressions).

2.4.2.1. La pluviométrie moyenne

Lors de l'étude de la pluviométrie d'une région quelconque, on remarque que les pluies moyennes mensuelles varient d'un mois à l'autre. On peut toujours discerner des mois plus ou moins pluvieux, et des mois relativement secs.

Le diagramme des pluies mensuelles comparées aux évaporations mensuelles montre l'importance de l'irrigation ou le drainage pour une zone climatique (Fig.21).

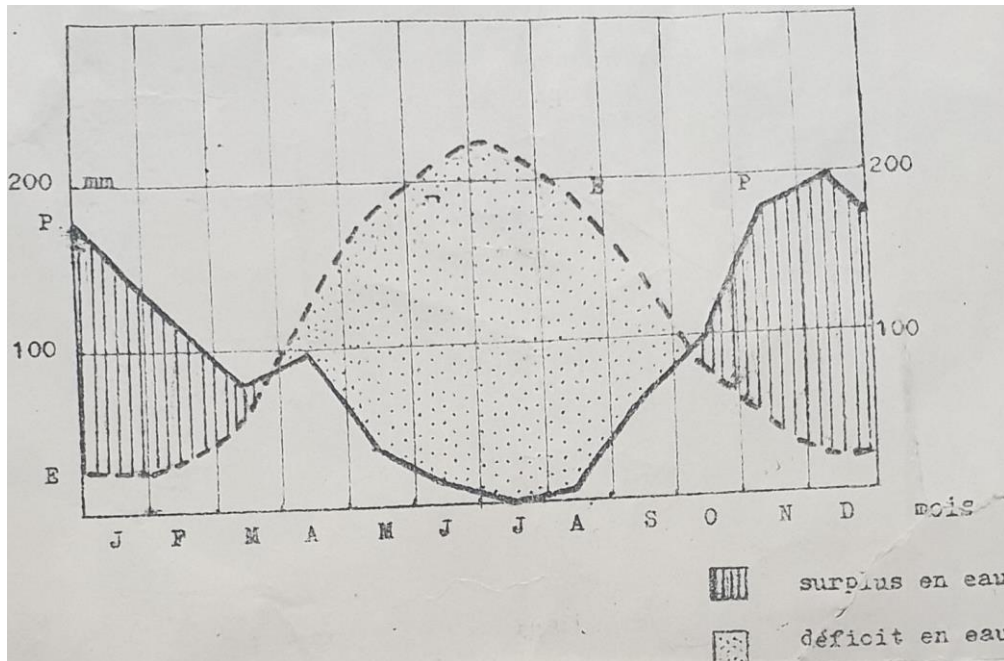


Fig.21 : Pluviométries et évaporations mensuelles

1. Les mois pluvieux, caractérisés par une pluie excède (dépasse) l'évaporation mensuelle, sont en principe les mois de drainage : il y a surplus d'eau qui doit être évacué ;
2. Les mois secs sont les mois ou l'évaporation excède la pluie c'est la période d'irrigation, parce que il faut une alimentation en eau supplémentaire afin d'assurer l'évapotranspiration pour la plante.

Ce diagramme permet d'estimer grossièrement l'excédent annuel d'une zone soit : P_i la pluie moyenne mensuelle en mm ; E_i l'évaporation moyenne en mm dans le mois (i) : L'excédent en eau est alors :

$$D = \sum_{i=1}^m (p_i - E_i)(mm)$$

Où (i) = 1 à m représente les mois Pluvieux.

Cette valeur correspond à la surface hachurée sur la fig. 21.

(NB : cet excédant annuel ne coïncide pas nécessairement avec le volume d'eau annuel à drainer. Il se peut qu'une partie s'infilte, s'écoule par voie souterraine, ou qu'elle soit évaporée après un stockage temporaire. Pour estimer le volume à drainer, on doit encore connaître le coefficient d'écoulement d'un bassin versant).

A/ la pluie critique

Comme nous avons déjà vu, ce sont les l'inondations de quelques jours, qui cousent les dégâts les plus importants aux plantes. Alors, plus qu'aux valeurs moyennes des pluies, nous nous intéressons aux pluies maximales tombées sur un intervalle de temps d'un à quelques jours.

Définition : La pluie critique est la quantité de pluie maximale qui tombe en un délai fixé, avec un temps de récurrence déterminé, que le réseau de drainage doit être capable d'évacuer.

Une pluie critique et donc déterminée par sa durée, son intensité pendant cette durée, et sa fréquence (temps de récurrence).

A.1. Pluie maximales journalière

A.1.1. Pluie maximales journalières

Pour l'étude des pluies maximales journalières, on sélectionne les maximas d'un mois ou d'une année, et on essaie d'y ajuster une loi statistique de distribution des extrêmes (par exemple Gumel, Gauss, loi log-normale).

Il existe divers types de papiers à probabilité, qui facilite le travail) des démarches à suivre sont les suivantes :

1. Déterminer les maximas journaliers pour une période choisie (mois, saison, année) ;
2. Ranger les maximas en ordre croissant (la loi de Gumbel) ou décroissant (loi log-normal) ;
3. Attribuer une fréquence de non dépassement à chaque observation, selon la formule :

$$F(n) = \frac{r - \frac{1}{2}}{N}$$

r : rang de l'observation ;

N : nombre total des observations ;

F(n) : Fréquence de non dépassement.

4. Reporter sur papier à probabilité correspondant, les valeurs des observations (en ordonnées) en fonction des fréquences ainsi calculées en abscisses ;
5. Tracer d'après les calculs la droite d'ajustement ;
6. La droite ainsi tracée permet d'estimer la pluie journalière maximale pour une fréquence quelconque ;
7. Le temps de récurrence T est égale à l'inverse de la fréquence au dépassement :

$$T = \frac{1}{F_1(n)}$$

$F_1(n)$: Dépassement

1- $f(n)$: non dépassement.

A.1.2. Pluie d'une durée autre que 24 heures

Méthode directes

A partir des fiches d'observations des pluies journalières, on peut déduire la valeur des pluies de plusieurs jours consécutifs par simple sommation des valeurs journalières.

1. Un pluviographe enregistre la pluie cumulée pendant une journée (une semaine, un mois) ;
2. Les pluviogrammes sont la représentation graphique de la pluie cumulée qui tombe dans cette période ;
3. L'intensité de la pluie de courte durée est calculée comme suit :

$$i_p = \frac{Dp}{Dt} = \frac{p_i - p_0}{t_i - t_0}$$

Où :

Dt : l'intervalle de temps considéré ($t_i - t_0$)

p_0 : la pluie cumulée de t_0

p_i : la pluie cumulée enregistrée à t_i

L'avantage de l'emploi des pluviogrammes pour l'étude des pluies de courte durée est dans le fait, que l'on peut choisir n'importe quel intervalle de temps Δt . Toutefois, le traitement des pluviogrammes est un travail assez long, vu qu'on a besoin de plusieurs années d'observation. En outre, les pluviographes sont onéreux et délicats, ce qui fait que toutes les régions ne sont pas dotées de tels appareils.

Méthode indirecte

L'analyse fréquentielle de courte durée a montré qu'il existe des rapports empiriques entre la durée d'une averse, son intensité et son temps de récurrence. On peut en déduire deux lois générales :

1/ Une pluie d'une durée fixée a une intensité d'autant plus forte que sa durée est plus rare.

2/ Pour une période de récurrence donnée une averse a une intensité d'autant plus forte que sa durée est plus courte.

L'expression mathématique pour ces rapport d'intensité – durée fréquence est de la forme :

$$i_p = \frac{a}{b + t} \text{ (TALBOT) pour des durées inférieures à 5 h.}$$

$$\text{Et } i_p = \frac{\hat{a}}{\sqrt{t}} \text{ (MONTANA) pour des durées supérieures à 5h.}$$

Dans lesquelles :

i_p : l'intensité de la pluie en mm/h

t : la durée de la pluie en minutes.

Les constantes a, b, c sont des valeurs spécifiques pour une station et un temps de récurrence donné.

Dans le tableau suivant, on trouve les formules déterminées pour calculer l'intensité des pluies de fréquences données (formules valables pour $0 < t \leq 5$ h).

Tableau 2 : Calcul de l'intensité des pluies de fréquences données.

Fréquences	i(mm/h)	fréquences	i(mm/h)
------------	---------	------------	---------

6 mois	$\frac{500}{4+t}$	10 ans	$\frac{2590}{10+t}$
1 an	$\frac{830}{5+t}$	20 ans	$\frac{2850}{10+t}$
2 ans	$\frac{1100}{7+t}$	50 ans	$\frac{3220}{11+t}$
5 ans	$\frac{2100}{9+t}$	80 ans	$\frac{7620}{34+t}$

B. le bilan hydrologique (hydrique)

De la pluie critique qui tombe sur une région, il y a seulement :

1. Une partie qui doit être évacuée ;
2. Une partie s'évapore E ;
3. Une partie s'infiltré dans le sol (I) ;
4. Et une partie ruisselle superficiellement.

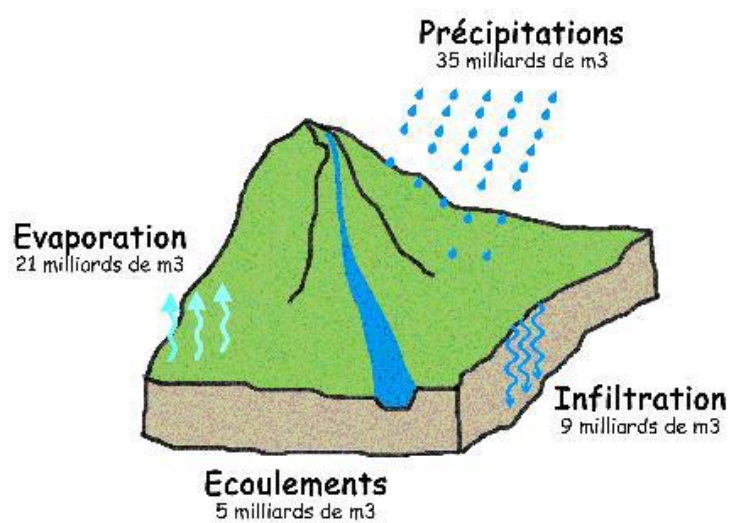


Fig.22 : Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique quantifie le sort des eaux de précipitations :

$$P = E + I + R$$

Divisant par p, on trouve les fractions :

$$\frac{E}{p} = e \text{ , } \frac{i}{p} = i \text{ , } \frac{R}{p} = r \text{ , } e+i+r=1$$

e : coefficient d'évaporation

i : coefficient d'infiltration

r : coefficient de ruissellement

La valeur de chaque coefficient dépend du climat, type du sol et type végétation sur la parcelle.

B.1. L'évaporation

Elle est fonction de différents facteurs du climat (T°, humidité, vitesse du vent et de la végétation) ; La végétation influence directement sur la quantité évaporée par transpiration des plantes, mais elle joue aussi un rôle de régulateur indirect des pluies. Elle diminue le ruissèlement direct et augmente l'infiltration.

Les valeurs des coefficient d'évaporation sont données par le tableau suivant :

Tableau 3 : Les valeurs des coefficients d'évaporation

Type de terrain	Coefficient d'évaporation
Terrains nus imperméables	0.1
Terrains labourés cultivés	0.3

Végétation dense prairies	0.5
Forêt dense	0.7

B.2.L'infiltration

Elle est fonction de la nature du terrain, Elle peut varier de 1mm/j pour les argiles lourdes à plusieurs metre par jours pour les sables grossiers. Pour les terrains nus à faible pente on peut admettre les valeurs suivantes de coefficient d'infiltration :

Tableau 4 : Les valeurs des coefficients d'infiltration

Type de sol	Coefficient d'infiltration
Sable	0.8
Limon sableux	0.5 à 0.6
Limon	0.4
Terres argileuses	0.2

B.2. Le ruissellement

Les mêmes facteurs interviennent sur la valeur du coefficient de ruissellement :

- ✓ La topographie (pente) ;
- ✓ La nature du sol ;
- ✓ Et la végétation (cultures).

On peut admettre, à titre indicatif général, les valeurs moyennes suivantes :

Tableau 5 : Les valeurs des coefficients de ruissellement

Type de sol	Coefficient de ruissellement
Surface vêtues	0.75 à 0.95
Terrains nus	0.10 à 0.30
Terres de cultures. prairie	0.15 à 0.25
Bois (terrain plat)	0.01 à 0.05
Bois en pente moyenne	0.05 à 0.20

Remarques

1. Ces chiffres indiqués de e, i et r ne sont valables que pour une parcelle seulement ;
2. On parle d'un coefficient d'écoulement (1-e) pour un bassin versant (Grande superficies) connaissant les valeurs de ces coefficients, on peut estimer la quantité à évacuer par le réseau de drainage ;
3. Si le réseau est absent ou superficiel, la fraction à évacuer est égale à la fraction de ruissellement (r) ;
4. Un réseau enterré n'aura à évacuer que la partie infiltrée (i) ;
5. Pour un réseau de drainage complet avec collecteurs la partie à évacuer est l'infiltration plus le ruissellement (i+r).

2.4.2.2. L'irrigation et les doses de lessivages

En périmètre irrigué, l'excès d'eau à évacuer provient le plus souvent en dehors de la période des pluies soit :

1. Des pertes d'eau dans le système de distributions ;

2. Des irrigations excessives ;
3. Des doses de lessivage appliquées pour empêcher l'accumulation de sels dans le sol.

2.4.2.3. Les apports latéraux

On parlera ici :

1. Des apports latéraux de surface (ruissellement) et débordements des oueds ;
2. Des apports Les apports latéraux souterrain (mouvement de nappes vers les dépressions).

Chapitre III : Les caractéristiques technique d'un réseau de drainage

III.1. Notions de régime d'écoulement: permanent et variable

Soit un sol équipé d'un réseau de drainage souterrain (fig. 23), considérons un mécanisme classique de formation et de développement d'une nappe ; Soit une pluie d'intensité (I) en (mm/jour) par exemple, supposons que cette pluie dure plusieurs jours d'affilée à intensité constante.

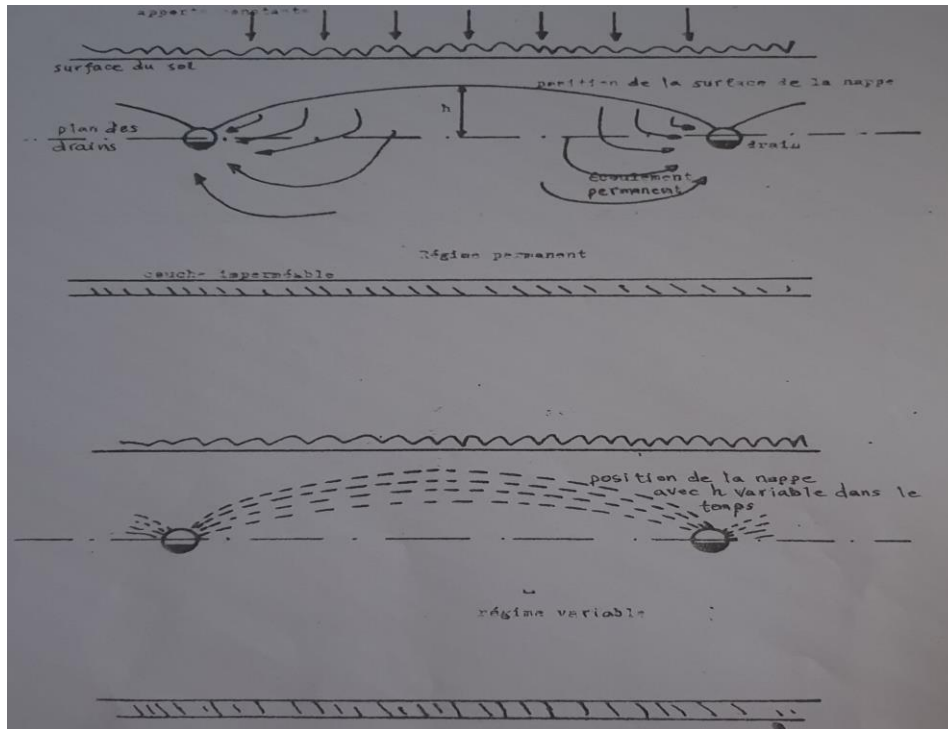


Fig.23 : Régime d'écoulement (Permanent et variable)

L'eau apportée s'infiltré en principe dans le sol, un front d'humidification se développe, finit par atteindre l'horizon imperméable, la nappe se forme et "monte" vers la surface au fur et à mesure des apports. A un moment donné, la nappe atteint et dépasse le niveau des drains, l'écoulement dans les tuyaux démarre, le drainage est amorcé ; l'écoulement vers les drains se produit avec une perte de charge, d'où la forme concave optée par la surface libre de la nappe.

Il est évident que la quantité d'eau évacuée dans les drains sera directement liée à la hauteur atteinte par la nappe au-dessus des drains (la charge h au-dessus des drains), cette charge constitue la force motrice de l'écoulement. Ainsi tant que le volume d'eau fourni à la nappe (pluie infiltrée) demeure supérieur au volume d'eau évacué dans les drains, la nappe continue de "grimper".

Il est donc probable, qu'à un moment donné le régime des apports sera compensé exactement par le régime d'évacuation à ce moment le niveau de la nappe ne bouge plus, le débit évacué par les drains demeure constant, « **un régime permanent** » s'est établi, ce régime durera tant que les apports se poursuivront à la même cadence.

Si la pluie s'arrête, la nappe n'est plus alimentée ; elle continue, cependant à alimenter les drains en "épuisant" la charge h acquise ; elle s'abaisse progressivement ; le régime correspondant est appelé « **variable** » car la charge (h) et le débit (q) évacué varient à chaque instant (on essaye d'obtenir un rabattement jusqu'au niveau voulu un délai bien déterminé (θ) après la fin de la pluie).

Il est très rare de rencontrer dans la réalité le régime permanent ; dans la plupart des cas le régime effectif d'écoulement est du type variable ; des équations sont disponibles pour caractériser ces deux types d'écoulement ; le régime variable est le plus représentatif de la réalité surtout en périmètre irrigué. L'élévation de la nappe est de :

$$D = \frac{h_0(1-e)}{\mu}$$

Avec

h_0 : hauteur de la pluie critique;

μ : porosité efficace du drainage ;

$(1-e)$: coefficient d'écoulement.

Le réseau devra être calculer pour que dans le délai de submersion admissible, la nappe revient à son niveau initial c'est-à-dire elle diminue de la hauteur Δ .

III.2. Le débit caractéristique

Le réseau de drainage doit donc être conçu de telle façon que la submersion des plantes ne dépasse pas, en principe, la durée admissible (θ) ; Connaissant la pluie critique qui tombe dans ce délai, et la fraction de cette pluie qui reste à évacuer, on est en mesure de calculer le débit caractéristique.

III.2.1. Définition

Le débit caractéristique d'un réseau de drainage est le débit par unité de surface à véhiculer par le réseau pour évacuer la pluie critique. Le calcul du débit caractéristique se fait différemment pour les deux régimes de drainage, en tenant compte ou non de la possibilité de stockage.

III.2.2. Débit caractéristique en régime permanent

Soit i_p l'intensité de la pluie critique, qui tombe en une durée de θ jours, on suppose, que la fraction de cette pluie à drainer par le réseau est la somme du ruissellement direct et de l'infiltration :

$$(r+i) = (1-e)$$

Le débit à évacuer par unité de surface est :

$$q_c = (1 - e) \cdot i_p \text{ (mm / j)}$$

Après reconversion en litres par seconde par hectare :

$$q_c = \frac{(1 - e)}{0,36} \cdot i_p \text{ (l / s / ha)}$$

$$(1 \text{ mm / h}) = \frac{10^4 \cdot 10^{-3}}{3600} \text{ m}^3 / \text{s} = \frac{1}{0,36} \text{ l / s / ha} \cdot \frac{\theta}{\theta}$$

On peut déterminer graphiquement le débit caractéristique à partir de la courte pluie-durée (fig. 24)

La pluie critique est la hauteur p qui tombe dans un intervalle de temps θ . La partie à évacuer sera la pluie moins l'évaporation, (la courbe $(1-e) \cdot p$), il suffit d'évacuer cette quantité en θ jours.

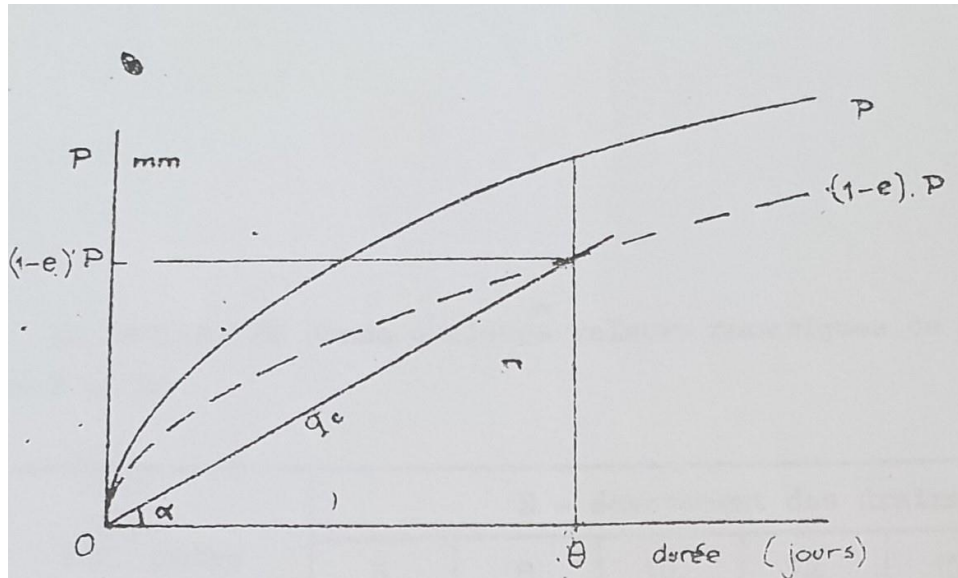


Fig.24 : Débit caractéristique en régime permanent

Donc le débit caractéristique est représenté par la droite qui mène de 0 au

point $(1-e) p$, dont la pente est:
$$tg = \frac{(1-e) \cdot p}{q} = (1-e) \cdot i_p \text{ (mm/h)}$$

III.2.3. Débit caractéristique en régime permanent en tenant compte du stockage

Le débit caractéristique suppose pour une culture un coefficient constant d'évaporation, si l'on connaît l'évaporation et les caractéristiques du sol, on est en mesure de déterminer plus exactement le débit caractéristique, en tenant compte du stockage temporaire dans le sol. La figure 25 montre la situation de base pour le calcul.

Soit (P) la pluie critique qui tombe sur la parcelle à drainer, (E) l'évaporation mesurée pendant les jours de pluie, et (S) le stockage dans le sol suite à une

remontée temporaire du niveau de la nappe. Toutes les quantités sont exprimées en (mm).

Une partie de stockage (s) de la pluie nette (P-E) peut être stockée dans le sol. Il reste alors à évacuer par le réseau de drainage : (P-E) - S en (mm) dans un délai de θ jours.

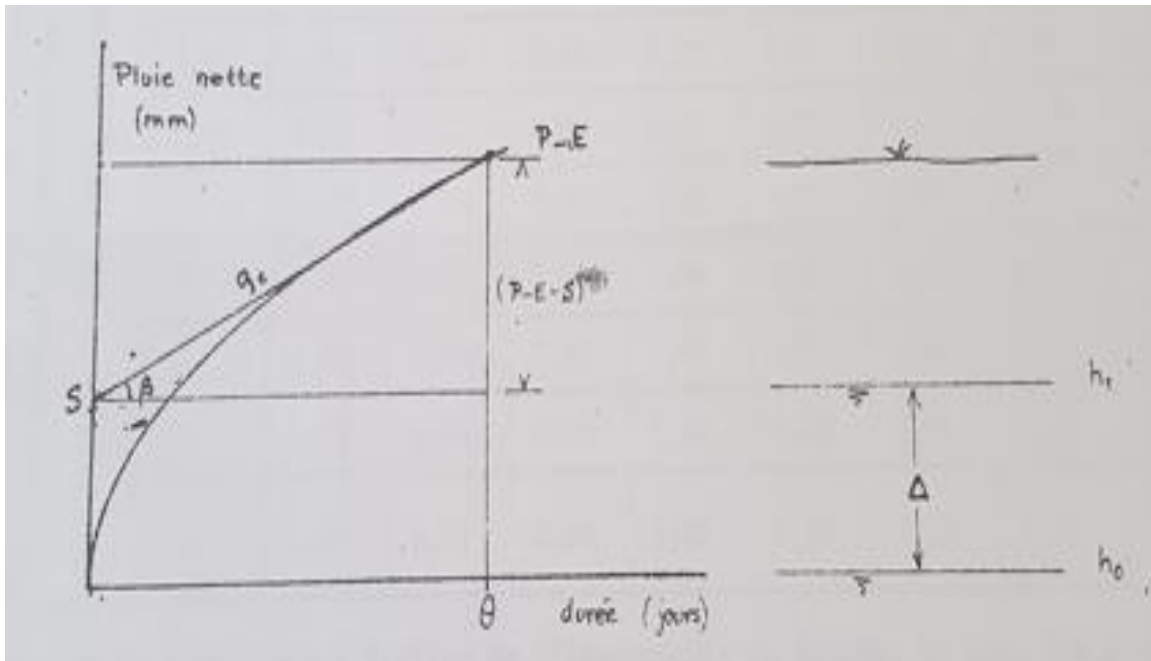


Fig.25 : Débit caractéristique en tenant compte du stockage

Le débit caractéristique est donc :

$$q_c = \frac{(p - E) - S}{q} \text{ mm/jour}$$

$$q_c = \frac{(p - E) - S}{q} \cdot \frac{1}{8,64} (1 / s / ha)$$

$$1 \text{ mm} / \text{jour} = \frac{1}{8,64} 1 / s / ha$$

III.2.4. Débit caractéristique en régime variable

Dans les régions, où le climat impose un régime variable (averses de grandes intensité avec des période inter-pluviales assez longues), on calcule le débit caractéristique uniquement en fonction de la capacité de stockage.

Soit S la fraction de la pluie, stockée dans le sol à la suite d'une averse. (La quantité de S sera limitée par le niveau de la nappe à ne pas dépasser), le rôle de réseau de drainage en régime variable, est de rabattre ce niveau de la nappe au niveau initial dans un délai déterminé θ .

$$q_c = \frac{S}{q} \text{ mm / j} = \frac{S}{q} - \frac{1}{8,64} (1 / \text{ha})$$

Graphiquement, le débit caractéristique est déterminé par la tangente de la droite 1-2 dans la figure 26, ou le point :

1. Correspond au niveau du stockage (S) ;
2. Correspond au niveau zéro du stockage, après le rabattement en un délai de θ jours.

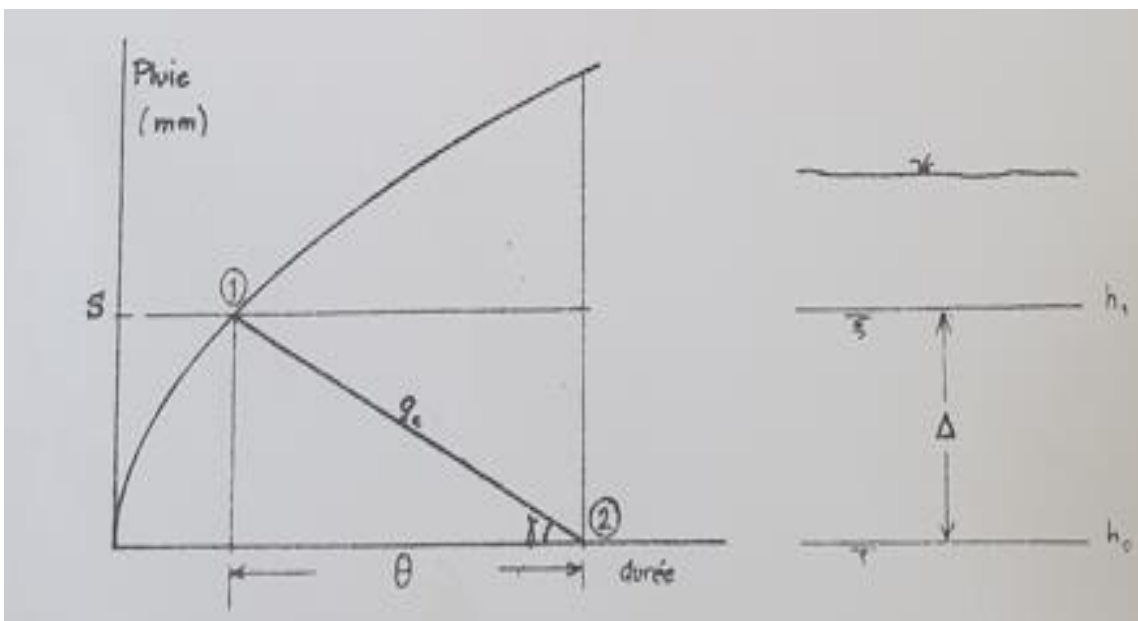


Fig.26 : Débit caractéristique en régime variable

Rq: En cas de doute du régime de drainage à choisir on s'assure d'une sécurité suffisante, en calculant le débit caractéristique pour les deux régimes et on choisit le débit le plus élevé.

Chapitre IV : étude théorique du drainage

IV.1. Étude théorique d'écoulement dans le sol

Par l'étude théorique on cherche à trouver une formule, permettant de quantifier cette relation ; le but de cette formule est de choisir un tel écartement des drains (pour un débit caractéristique et une perméabilité donné), que le niveau de la nappe ne dépasse pas la limite tolérée.

Pour l'étude théorique de l'écoulement dans le sol, on considère une tranche de sol entre deux drains, d'une épaisseur de l'unité (1m), on prend un système de coordonnées, avec comme axes de référence :

- Un axe horizontal (ox) se trouvent au niveau du substratum imperméable ;
- Et un axe vertical (oy) médiatrice entre les drains (figure 27) ;

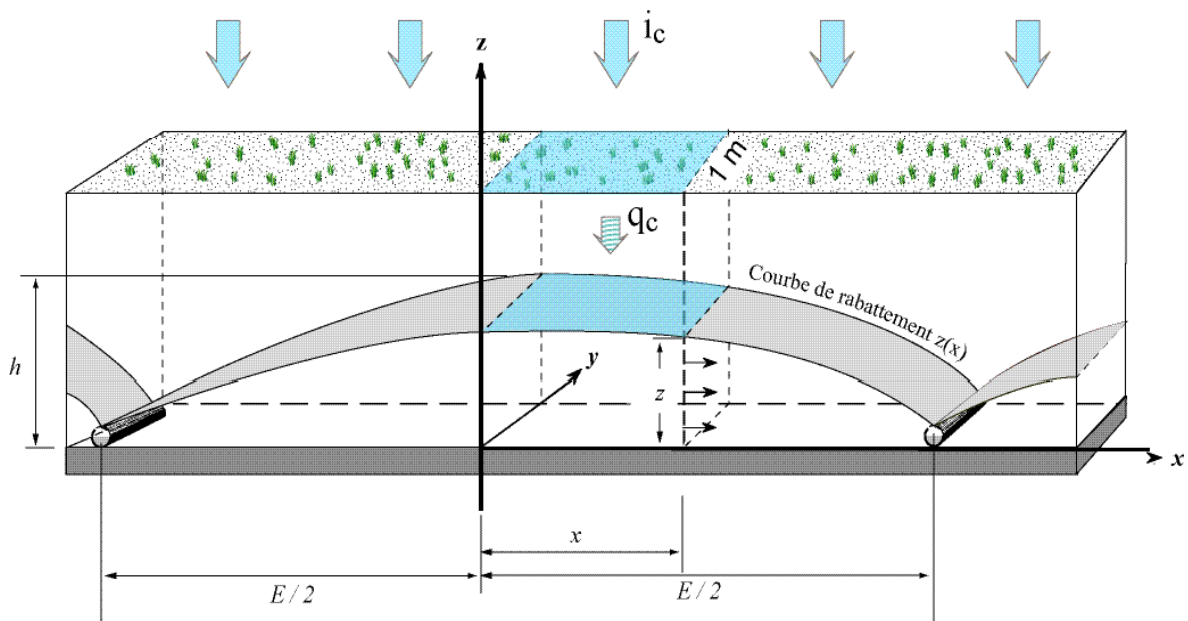


Fig.27 : Etude théorique de l'écoulement

Ce système nous permet de décrire analytiquement la position de la nappe et de l'écoulement. Cette relation peut s'écrire :

$$h_c = f(q_c, k, E)$$

Où :

h_c : la charge au-dessus des drains

q_c : le débit caractéristique

K : la perméabilité du sol

E : l'écartement des drains

Remarque : Débit caractéristique : débit par unité de surface

Débit unitaire : débit par unité de longueur

IV.3. Ecoulement vers les drains en régime permanent

En appliquant la loi de Darcy, nous allons chercher la relation qui lie (E) des drains, la charge (h) et le débit caractéristique (q_c). Sur une distance d_x l'écoulement est horizontale et générer par la loi de Darcy :

$$q = k . s . i$$

effectué par la charge $\frac{dy}{dx}$.

IV.3.1. Drains reposant sur le substratum imperméable

Dans ce cas tout l'écoulement se produit au-dessus du niveau des drains (fig.28).

$$j = k . s . I$$

Avec :

K: conductivité hydraulique

S = $\gamma \cdot 1$ m

Cette relation entre l'E et la charge de la nappe h_c montre que pour un sol déterminé et un débit caractéristique donné, E et h_c sont directement proportionnels.

IV.3.2. Drains au-dessus de la couche imperméable à une profondeur

Hooghoudt a constaté qu'on peut employer la formule suivante pour le cas des drains qui sont au-dessus de la couche imperméable, il a employé la profondeur R, appelée la « profondeur fictive de l'imperméable » (Fig.28).

$$E^2 = \frac{4ksh_c^2 + 8k_i R h_c}{q_c} \text{ (hooghoudt)}$$

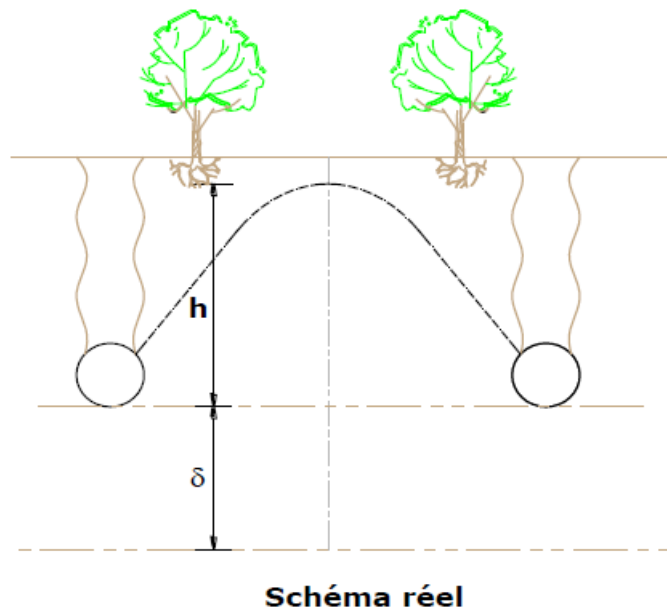


Fig.28 : Drains au-dessus de la couche imperméable

On voit que le premier terme correspond à l'équation trouvée pour l'écartement dans le cas où les drains reposent sur la couche imperméable, en d'autres mot, ce terme représente l'écoulement au-dessus drains. Tandis que le deuxième terme correspond à l'écoulement au-dessous du niveau d'eau. On

peut remplacer la perméabilité dans les deux termes par la perméabilité (k supérieur et k inférieur, respectivement).

Avec

E : écartement des drains (m)

K_s : perméabilité au-dessus du plan des drains

K_i : perméabilité au-dessous du plan des drains

h_c : charge au-dessus des drains

q_c : débit caractéristique

R : profondeur fictive de l'imperméable

la valeur de R est fonction de:

- La profondeur réelle de l'imperméable (p)
- L'écartement des drains (E)

Le tableau 6 donne quelques valeurs numériques de R pour des valeurs courantes de P et E .

Tableau6 : Profondeur fictive de l'imperméable en dessous du plan des drains (analogie de Hooghoudt).

R en mètre	E - écartement des drains en mètres.								
	5	8	10	12	15	20	30	50	
0,50	0,39	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	
0,75	0,47	0,54	0,58	0,61	0,64	0,67	0,70	0,74	
1,00	0,52	0,62	0,68	0,72	0,76	0,81	0,87	0,91	
1,50	0,53	0,72	0,80	0,87	0,95	1,05	1,18	1,27	
2	0,53	0,74	0,87	0,95	1,07	1,21	1,41	1,59	
3	0,53	0,76	0,90	1,00	1,19	1,40	1,73	2,07	
5	0,53	0,76	0,90	1,01	1,28	1,54	2,01	2,64	
10	0,53	0,76	0,90	1,02	1,29	1,55	2,14	3,18	
∞	0,53	0,76	0,90	1,02	1,30	1,56	2,15	3,28	

IV.4. Ecoulement vers les drains en régime variable

Dans le régime variable d'évacuation, les drains servent à évacuer l'eau stockée dans le sol, dans un délais déterminé θ , donc le niveau de la nappe s'abaisse de h_{c0} à h_{c1} pendant le temps θ (fig. 29). La distance Δ sur laquelle le niveau de la nappe se déplacer est appelée le rabattement.

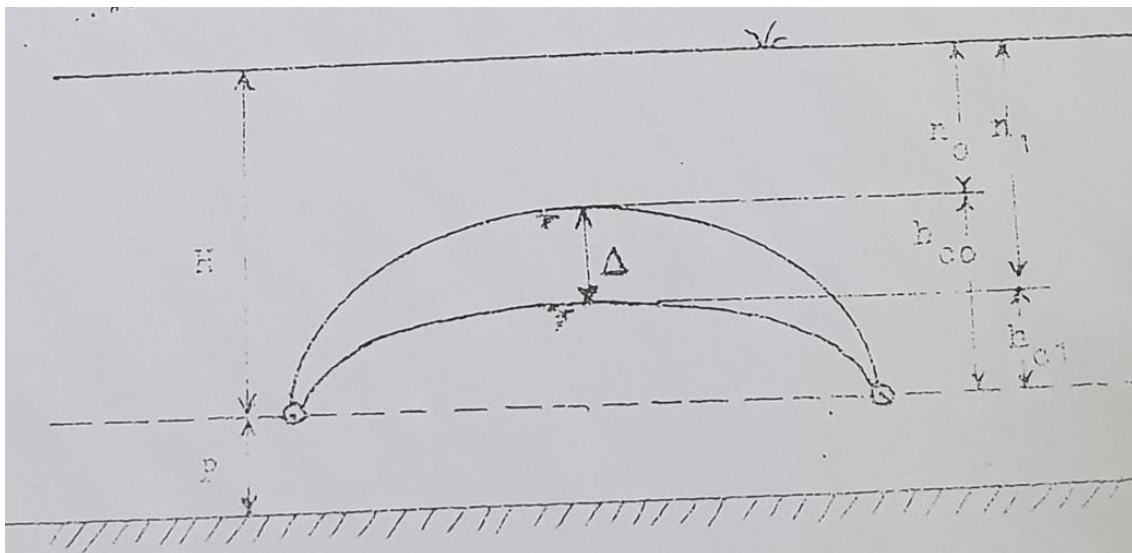


Fig.29 : Drainage en régime variable

IV.4.1. Drains se posant sur la couche imperméable

L'écartement est donné par la formule suivante :

$$E^2 = \frac{4.k.q}{u} \cdot \frac{h_{c1}.h_{c0}}{(h_{c0} - h_{c1})}$$

Ou si on remplace $(h_{c0} - h_{c1})$ par (D):

$$E^2 = \frac{4.k.q}{u} \cdot \frac{(h_{c0} - D)h_{c0}}{D}$$

Cette formule permet de calculer l'écartement E à donner aux drains lorsque l'on s'est fixée θ , h_{c0} et Δ et que l'on connaît les caractéristique k et μ du sol.

IV.4.2. Fossés profonds au-dessus de la couche imperméable avec une charge quelconque.

Les drains sont alimentés à la fois par la couche supérieure de perméabilité k_s et par la couche inférieure de perméabilité k_i sur une profondeur fictive R.

$$E^2 = \frac{4.k_i.R.q}{M D y}$$

$$\text{Avec : } D y = y_1 - y_2 = 1,15 \log_{10} \frac{\frac{e}{e} (2R + k_s / k_i . h_{c1}) . h_{c0} \frac{\mu}{\theta}}{\frac{e}{e} (2R + k_s / k_i . h_{c0}) . h_{c1} \frac{\mu}{\theta}}$$

Dans ces formules, les valeurs de k, μ et p sont des données de bases. Le débit caractéristique doit être exprimé dans les mêmes unités que k (ex:m/j). La durée θ dans les formules du régime variables, est la durée pendant laquelle le rabattement doit être réalisé. Elle est à choisir en fonction des cultures. θ doit être exprimée dans la même unité de temps que k (par ex si k est exprimé en m /jour, θ est la durée en jours). h_c est la charge critique en dessus des drains (en m), on la calcule en fonction de la profondeur des drains (H) et la profondeur minimale à ne pas dépasser (n) (fig.29).

La difficulté pour les formule de type (drains au-dessus de d'imperméable) réside dans le fait, que R est fonction de E. On résout le problème par approximations E' et en déduit R (tableau 6). Ceci permet de calculer une valeur approximative de E. qui sert pour corriger la valeur précédemment choisie de E', lorsque l'écartement estimé E' approche suffisamment l'écartement calculé E, le résultat peut être considéré comme valable.

TDN n°1 : calcul du débit caractéristique (Débit de projet) (qc)

Exercice 1

Débit caractéristique pour des terres labourables cultivées en céréales.

Calculer le débit caractéristique (qc) de ces terres sachant que :

- La fréquence limite d'apparition est de 1 an ;
- La durée de la pluie est $\theta = 3$ jours ;
- Le coefficient d'écoulement (1-e) qui est égales à 0,60.

Exercice 2

Débit caractéristique pour les prairies

Calculer le débit caractéristique de ces terres sachant que :

- La durée de submersion (θ) est égale à 7 jours ;
- La période de retour est de 1 an ;

- Le coefficient d'écoulement $(1-e) = 0,60$.

Exercice 3

Calculer le débit caractéristique sachant que :

- La chute du rendement au début du cycle de la culture de betterave est de 10 % d'après le tableau de Salamin, la durée est de 3 jours ;
- U période de retour est 1 an ;
- $r+i+e = 1$ avec $r=0.35$ et $i = 0.25$.

Exercice 3

Prenons une culture des céréales sur un sol lourd :

- Niveau optimale de la nappe (h_0) = 0,80m
- Niveau maximal toléré de la nappe (h_1) = 0,20m
- Porosité efficace $\mu = 0,10$
- Durée admissible de cette remontée $\theta = 3$ jours.
- La pluie critique pour $t = 2$ ans est $p_c = 96$ mm.
- L'évaporation est négligeable.

Calculer de débit caractéristique en régime permanent et en régime variable.

TD n° 2 : Calcul des écartements entre les drains en régime permanent et en régime variable

Exercice 1

Calculer la distance entre des drains, sachant qu'en régime permanent

$$q_c = 0,005m / 24^h$$

$$h_c = 0,60m$$

$$k_s = 1m / 24^h$$

$$k_i = 0,5m / 24^h$$

$$p = 1,5m$$

Exercice 2

Calculer l'écartement entre des drains, sachant qu'en régime variable:

$$h_{co} = 0,80m$$

$$h_{c1} = h_{co} - 0,25 = 0,80 - 0,25 = 0,55m$$

$$k_s = 1m / 24^h$$

$$k_i = 0,5m / 24^h$$

$$p = 5m$$

$$\frac{k_s}{k_i} = 2$$

$$m = 0,03. \quad q = 1 \text{ jour} = 24^h$$

Exercice 3

On dispose des données suivantes :

- La porosité efficace $\mu = 0.10$;
- Une couche imperméable à une profondeur de 2,50 m en dessous du sol ;
- La perméabilité au-dessus des drains: $k_s = 10^{-5} m / s$;
- La perméabilité au-dessous des drains: $k_i = 5.10^{-6} m / s$;
- Drains à une profondeur $H=1m$;

Calculer l'écartement entre les drains pour les deux régimes d'écoulement sachant :

- Qu'en régime permanent, les pluies sont longues et de faible intensité, une pluie critique de 0,80 mm/h, un coefficient d'écoulement $(1-e) = 0,65$, la nappe ne s'élève pas à plus de 0,4m de proximité de la surface du sol.
- En ce qui concerne le régime variable, nous supposons au contraire que le climat comporte des pluies fortes mais courtes, par exemple une pluie de durée non précisée mais inférieure à cinq heures, à donner une hauteur d'eau totale de 60mm, pluie que nous prendrons comme pluie critique : En supposant qu'avant le début de la pluie, la nappe se trouvait à son niveau optimal de 0,65m au-dessous de la surface du sol, avec un coefficient d'écoulement de 0,67.

Deuxième partie

Drainage et salinité en périmètres irrigués

Chapitre V : Salinité des eaux

V.1. Quelques cas de salinisation des terres irriguées des climats chauds

La plaine de Mésopotamie autrefois fertile est aujourd'hui stérilisée par le sel. Cette salinisation est due à des siècles d'irrigation sans drainage suffisant. En Algérie la plaine entre Relizane et Mahammadia sous cultures d'agrumes connaît des affleurements de croûtes blanches de sel. En Egypte, depuis que la crue annuelle du Nil a été supprimée par la création du barrage d'Assouan on

remarque une remontée saline dans la vallée. En Casamance au Sénégal, le drainage d'anciennes mangroves [mangroves = terres envahies par l'eau salée de la mer lorsque les marées sont hautes ; l'eau s'en retire à marée basse] donne lieu à une très forte acidification du sol liée à l'oxydation des sulfures en acide sulfurique. D'où la nécessité de neutraliser cette acidité par des apports calcaires.

V.2. Diagnostic et morphologie des sols sales

Les sols salés ou sols halomorphes ou sols sodiques sont ceux qui renferment en quantité anormalement élevée des sels plus solubles que le gypse (CaSO_4). Sont également considérés comme salsodiques les sols refermant, en quantité anormalement élevée du sodium échangeable, sans que la teneur en sels solubles soit obligatoirement forte. Le diagnostic des sols salsodiques repose sur la prise en compte et la combinaison de 3 types de critères :

1. critères chimiques et physico-chimiques ;
2. critères morphologiques ;
3. critères sur la structure de sol.

V.3. Origines de la salinité de l'eau

La salinité de l'eau d'irrigation provient de l'une ou de plusieurs des trois sources suivantes :

- Origine géologique ;
- Proximité de la mer ;
- Augmentation de la concentration en sels liée à une forte évaporation ;
- Utilisation d'eau d'irrigation de mauvaise qualité ;
- Engorgement temporaire ou permanent du sol. La salure de l'eau reste fixée au sol après ressuyage ;

- Le drainage naturel où l'eau est livrée par des bassins qui contiennent de grandes quantités de sels alcalins dans les sols et les roches ;
- Le transport dans des rivières ou des canaux à travers des formations de sol ou de roches qui sont fortement imprégnés de sels alcalins ;
- La concentration de sels dans les parties les plus basses de cours d'eau et de rivières qui reçoivent de grandes quantités d'eau d'infiltration et l'écoulement de retour des régions Irriguées.

Les origines les plus importantes et les plus dangereuses des sels dans l'eau d'irrigation sont la filtration et l'écoulement de retour.

V.4. Salinisation du sol

La salinisation du sol est le processus d'accumulation de sels à la surface du sol et dans la zone racinaire qui occasionne des effets nocifs sur les végétaux et le sol ; il s'en suit une diminution des rendements et, à terme, une stérilisation du sol.

V.5. Types de salinisation

V.5.1. Salinisation primaire ou naturelle

Elle est due aux sels qui se forment lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes :

- ✓ Dans les régions côtières, intrusion d'eau salée ou submersion des terres basses
- ✓ Inondations périodiques par de l'eau de mauvaise qualité
- ✓ Remontée d'une nappe phréatique salée près de la zone racinaire

V.5.2. Salinisation secondaire

Elle est induite par l'activité humaine ; liée fréquemment à des pratiques agricoles inappropriées.

V.6. Causes principales de la salinisation

Parmi les principales causes :

- ✓ Utilisation d'une eau d'irrigation de qualité médiocre et lessivage naturel insuffisant ;
- ✓ Remontée de la nappe souterraine à proximité de la surface et transport de sels par remontées capillaires.

V.7. Caractéristiques des sols salés

Les sols affectés de problèmes de salinité présentent :

- ✓ Des concentrations excessives en sels solubles (sols salins) ;
- ✓ En sodium adsorbé (sols sodiques ou alcalins)
- ✓ Ou les deux (sols alcalino-salins).

Les sels solubles concernés sont essentiellement : Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3 (bicarbonates), et NO_3^- .

V.8. Sols salés et/ou sodiques

Les sols salés ou salins sont des sols contenant en excès des sels solubles qui rendent la solution du sol suffisamment concentrée pour nuire aux plantes et diminuer la productivité du sol. Le terme de "sols alcalins" est appliqué aux sols qui ont en excès du sodium échangeable avec ou sans un total excessif de sels solubles. La cause fondamentale de l'existence d'un sol salin ou alcalin provient d'une application d'eau insuffisante. Dans les régions arides, l'insuffisance ou l'absence de filtration à travers les sols du fait de la faible pluviométrie, et en même temps la forte évaporation de l'eau font augmenter l'accumulation sur et dans le sol de sels solubles qui portent préjudice à la vie des plantes.

A force d'être exploités sous irrigation, certains sols des régions arides deviennent salés et improductifs du fait de l'utilisation d'une eau d'irrigation renfermant de trop grandes quantités de sels.

Les sels continuent de s'accumuler dans les sols des surfaces irrigués où l'on apporte des quantités d'eau plus grandes que celles qu'on en retire.

V.8.1. Mesure de la salinité des sols

EC_w25°C donne la salinité des sols. L'échantillon de sol amené à la saturation par des additions successives d'eau distillée est placé sur un Büchner, et soumis au vide. La faible quantité d'eau qui est alors recueillie est l'extrait saturé sur lequel on fait la mesure de EC_w25°C, exprimée milliéquivalent par litre (még.l⁻¹) et micromhos par centimètre (mmhos. Cm⁻¹). On peut également opérer avec des solutions plus dilués (1/10 ou 1/15) dont les résultats doivent être rendus comparables à ceux de l'extrait saturé. (Tableau 7).

Tableau 7 : Echelle de salinité des sols d'après J.H.Durand

Degré de salinité	Non salin	Légèrement salin	Salin	Très salin	Extrêmement salin
m.e % ⁽¹⁾	2.5	5	10	20	
EC _w 25°C en micromhos par cm					
- extrait 1/10	250	500	1000	2000	
- extrait 1/15	500	1000	2000	4000	
Extrait saturé Riverside	2000	4000	8000	16000	

(1) m.e % = milliéquivalent pour 100 g de sol noté aussi me/100.

V.8.2. Résistance des plantes à la salinité du sol

L'United state Salinity Laboratory a proposé en 1954 l'échelle ci-après par référence à la résistance des plantes à la salinité du sol.

Tableau 8 : Résistance des plantes à la salinité des sols

EC _w (mmho.cm ⁻¹)	Effets sur les plantes
0 - 2	Effets de la salinité négligeables
2 - 4	Les rendements des cultures très sensibles peuvent baisser
4 - 8	Les rendements de la plupart des cultures chutes
8 - 16	Plantes tolérantes seulement
16 - 32	Quelques plantes tolérantes seulement

V.9. La salinité (qualité chimique de l'eau d'irrigation)

On évalue la salinité des eaux d'irrigation par la mesure de deux paramètres :

V.9.1. La conductivité électrique ou "Electric conductivity" (EC_w), ramenée à 25°C.

La conductivité électrique est mesurée au moyen d'un conductimètre. C'est un appareil qui mesure l'intensité du courant électrique passant entre deux électrodes placées dans l'eau ou le sol. Plus le sol ou l'eau est chargé de sel, plus le courant passe facilement.

EC_w s'exprime en déci-Siemens par mètre (dS.m⁻¹) ou en millimhos par centimètre (mmho.cm⁻¹). Les unités dS.m⁻¹ et mmho.cm⁻¹ sont équivalentes et correspondent à 0.64 gramme de sel par litre.

- ✓ Pour l'eau de mer EC_w25° est de l'ordre de 50 mmhos.cm⁻¹
- ✓ Pour la qualité de l'eau d'irrigation, EC_w25° limite est de 5 mmhos.cm⁻¹.

V.9.2. Le coefficient d'adsorption du sodium ou "Sodium Adsorption Ratio" (SAR)

Ce coefficient représente la sodicité de l'eau, la sodicité d'une eau traduit la propriété qu'a cette eau de modifier la proportion des cations échangeables d'un sol et en particulier d'augmenter la proportion de sodium, quand elle est

mise en contact prolongé avec le sol (irrigation, inondation, remontée de nappe, etc.). Le SAR est calculé par la formule suivante :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\left[\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2} \right]^{1/2}}$$

ECw et SAR sont utilisés en combinaison pour la classification des eaux d'irrigation.

V.10. Contrôle de la salinité dans le cas d'une origine externe des sels

V10.1. Irrigation avec des eaux salines

Le bilan général des sels pour un sol donné entre deux instants t_0 et t_1 se présente comme suit :

$$H_w EC_w - H_{dw} EC_{dw} = (\theta_1 EC_{sw1} - \theta_0 EC_{swo}) \bar{x}$$

*[Entrée de sels par l'eau d'irrigation] - [Sortie de sels dans l'eau de drainage] =
[Variation du stock de sels dans la tranche de sol d'épaisseur x]*

Avec :

- ✓ H_w = hauteur d'eau d'irrigation en mm ;
- ✓ EC_w = conductivité de l'eau d'irrigation en mmhos.cm^{-1} ;
- ✓ H_{dw} = hauteur d'eau de drainage en mm ;
- ✓ EC_{dw} = conductivité de l'eau de drainage en mmhos.cm^{-1} ;
- ✓ x = épaisseur de la tranche de sol en mm;
- ✓ θ_0 = humidité volumique à l'instant t_0 ;
- ✓ θ_1 = humidité volumique à l'instant t_1 ;
- ✓ EC_{swo} conductivité électrique de la solution de sol à l'humidité θ_0 ;
- ✓ EC_{sw1} = conductivité électrique de la solution de sol à l'humidité θ_1 .

V.10.2. Contrôle de la salinité dans le cas d'une origine interne des sels

Les phénomènes de salinité ont fréquemment pour origine une remontée des solutions salines par capillarité à partir d'une nappe phréatique minéralisée qui constitue la source de la salinisation du sol.

En effet, les problèmes de salinité rencontrés en agriculture irriguée sont souvent liés à la présence d'une nappe non contrôlée située entre 1 et 2 mètres de la surface du sol ; En nappe peu profonde, l'eau pénètre dans la zone racinaire et active la capillarité.

Si la nappe peu profonde est salée, elle constitue une source permanente de sels au fur et à mesure que l'eau est utilisée par la culture ou qu'elle s'évapore à la surface du sol ; La salinisation à partir de cette source peut être rapide dans les périmètres irrigués des régions chaudes lorsque des étendues de terre restent longtemps en jachère.

À cet effet la mise en évidence du processus de salinisation du sol à partir d'une nappe peu profonde est réalisée par l'étude des profils salins du sol.

V.10.3. Définition de la profondeur critique

On appelle profondeur critique de la nappe, la distance à laquelle il apparaît nécessaire de maintenir le plan d'eau pour que la remontée capillaire de la solution saline n'atteint pas la surface du sol. A la profondeur critique, la nappe salée ne présente aucun danger.

Tableau 9 : Les profondeurs critiques en (m)

	Sols limono-sableux	Autres types de sols
Profondeur critique	2	1.5

V.11. Méthodes de lutte contre la salinité

Il est nécessaire de contrôler la salinité pour maintenir les rendements à des niveaux acceptables. Plusieurs méthodes ou combinaisons de méthodes existent.

V.11.1. Lessivage des sels

Il consiste à apporter suffisamment d'eau pour qu'une partie percole à travers et sous la zone racinaire, entraînant avec elle un pourcentage des sels accumulés.

Après mise en place des drains visant à maintenir la nappe en dessous du niveau critique, il apparaît nécessaire de lessiver les sels en excès dans le profil pédologique.

V.11.1.1. Fraction de lessivage LF

La fraction de l'eau appliquée qui traverse la totalité de la profondeur racinaire et percole au-delà s'appelle la fraction de lessivage (LF).

$$LF = \frac{\text{Hauteur d'eau percolant sous la zone racinaire}}{\text{Hauteur d'eau appliquée en surface}}$$

V.11.1.2. Besoins en lessivage : (Leaching requirement LR)

Les besoins en lessivage (LR) sont calculés par l'équation de RHOADES et MERRILL (1976) :

$$LR = EC_w / (5 (EC_e) - EC_w) \quad (3)$$

Avec :

LR: besoin en lessivage;

EC_w : salinité de l'eau d'irrigation ;

ECe : salinité moyenne du sol tolérée par la culture mesurée sur un extrait de sol saturé. On obtient la valeur de ECe pour la culture considérée et le rendement correspondant accepté à partir des tableaux ci- après.

Tableau 10 : Tolérance et rendement potentiel des cultures de plein champ en fonction de la salinité de l'eau (ECw) et du sol (ECe)

CULTURES DE PLEIN CHAMP	RENDEMENT POTENTIEL ¹									
	100%		90%		75%		50%		0% "maximum" ³	
	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w	EC _e	EC _w
Orge (<i>Hordeum vulgare</i>) ⁴	8,0	5,3	10	6,7	13	8,7	18	12	28	19
Coton (<i>Gossypium hirsutum</i>)	7,7	5,1	9,6	6,4	13	8,4	17	12	27	18
Betterave à sucre (<i>Beta vulgaris</i>) ⁵	7,0	4,7	8,7	5,8	11	7,5	15	10	24	16
Sorgho (<i>Sorghum bicolor</i>)	6,8	4,5	7,4	5,0	8,4	5,6	9,9	6,7	13	8,7
Blé (<i>Triticum aestivum</i>) ^{4,6}	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,3	13	8,7	20	13
Blé, poulard (<i>Triticum turgidum</i>)	5,7	3,8	7,6	5,0	10	6,9	15	10	24	16
Soja (<i>Glycine max</i>)	5,0	3,3	5,5	3,7	6,3	4,2	7,5	5,0	10	6,7
Dolique (<i>Vigna unguiculata</i>)	4,9	3,3	5,7	3,8	7,0	4,7	9,1	6,0	13	8,8
Arachide (<i>Arachis hypogaea</i>)	3,2	2,1	3,5	2,4	4,1	2,7	4,9	3,3	6,6	4,4
Riz (paddy) (<i>Oriza sativa</i>)	3,0	2,0	3,8	2,6	5,1	3,4	7,2	4,8	11	7,6
Canne à sucre (<i>Saccharum officinarum</i>)	1,7	1,1	3,4	2,3	5,9	4,0	10	6,8	19	12
Maïs (<i>Zea mays</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,7
Lin (<i>Linum usitatissimum</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,7
Gros. fève (<i>Vicia faba</i>)	1,5	1,1	2,6	1,8	4,2	2,0	6,8	4,5	12	8,0
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,3	4,2

Tableau 11 : Tolérance et rendement potentiel des cultures maraichères en fonction de la salinité de l'eau (ECw) et du sol (ECe)

CULTURES MARAICHÈRES										
Citrouille (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	4,7	3,1	5,8	3,8	7,4	4,9	10	6,7	15	10
Betterave rouge (<i>Beta vulgaris</i>) ⁵	4,0	2,7	5,1	3,4	6,8	4,5	9,6	6,4	15	10
Giraumon (<i>Cucurbita pepo melopepo</i>)	3,2	2,1	3,8	2,6	4,8	3,2	6,3	4,2	9,4	6,3
Brocoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2,8	1,9	3,9	2,6	5,5	3,7	8,2	5,5	14	9,1
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	13	8,4
Cantaloup (<i>Cucumis sativus</i>)	2,5	1,7	3,3	2,2	4,4	2,9	6,3	4,2	10	6,8
Epinard (<i>Spinacia oleracea</i>)	2,0	1,3	3,3	2,2	5,3	3,5	8,6	5,7	15	10
Celeri (<i>Apium graveolens</i>)	1,8	1,2	3,4	2,3	5,8	3,9	9,9	6,6	18	12
Chou (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1,8	1,2	2,8	1,9	4,4	2,9	7,0	4,6	12	8,1
Pomme de terre (<i>Solanum tuberosum</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,7
Maïs sucré (<i>Zea mays</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10	6,7
Patate douce (<i>Ipomoea batatas</i>)	1,5	1,0	2,4	1,6	3,8	2,5	6,0	4,0	11	7,1
Poivron (<i>Capsicum annuum</i>)	1,5	1,0	2,2	1,5	3,3	2,2	5,1	3,4	8,6	5,8
Laitue (<i>Lactuca sativa</i>)	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,1	3,4	9,0	6,0
Radis (<i>Raphanus sativus</i>)	1,2	0,8	2,0	1,3	3,1	2,1	5,0	3,4	8,9	5,9
Oignon (<i>Allium cepa</i>)	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9	7,4	5,0
Carotte (<i>Daucus carota</i>)	1,0	0,7	1,7	1,1	2,8	1,9	4,6	3,0	8,1	5,4
Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,3	4,2
Navette (<i>Brassica rapa</i>)	0,9	0,6	2,0	1,3	3,7	2,5	6,5	4,3	12	8,0

V.11.1.3. Hauteur totale d'eau appliquée annuellement (A W)

Le calcul de la hauteur total appliquée annuellement est donnée par la formule suivante :

$$AW = ETM / 1 - LR$$

Avec :

AW (mm / an) = hauteur d'eau appliquée par an ;

ETM (mm / an) = besoins en eau de la culture ;

LR besoins de lessivage exprimés sous forme de fraction (fraction de lessivage).

V.11.1.4. Calendrier du lessivage

Selon la complexité des cas, le lessivage peut être effectué :

- ✓ À chaque irrigation
- ✓ Une irrigation sur deux,
- ✓ De façon saisonnière ou à des intervalles de temps plus longs cela dépend de la tolérance de la culture.

En tout état de cause, les besoins en lessivage doivent être satisfaits pour éviter l'accumulation excessive de sel. Il faudra tenir compte de l'eau de pluie lors du calcul des besoins en lessivage.

V.11.2. Le drainage

Un bon drainage permet de contrôler la salinité à long terme. Si le drainage est adapté, la hauteur d'eau de lessivage requise dépend de la :

- Tolérance au sel ;
- Culture ;
- Salinité de l'eau appliquée.

Un drainage satisfaisant permettant de maintenir la nappe à une profondeur ne présentant aucun danger (habituellement, au moins 2 mètres) constitue une solution efficace au problème de salinisation du sol. Des drains ouverts ou enterrés ou des puits drainants peuvent être utilisés.

V.11.3. Tolérance des cultures à la salinité

En présence d'une salinité élevée, la hauteur d'eau de lessivage peut être prohibitive, rendant nécessaire le choix d'une culture plus tolérante au sel, si toutefois les conditions économiques du marché le permettent. Le changement de culture pour se prémunir contre les effets de salinité est une mesure

radicale qui ne peut être envisagée qu'après expérimentation des méthodes "douces" (lessivage, drainage).

Tableau 12 : Tolérance à la salinité de certaines cultures (US. Salinity Laboratory)

Dans chaque liste, les espèces les plus résistantes sont citées en premier, les moins résistantes en dernier

Type de culture	Tolérance au sel			
	Bonne (Groupe I)	Modérée (Groupe II)		Médiocre (Groupe III)
Fruit	Datte	Grenade Figue Raisin Olive		Pamplemousse Poire Amande Abricot Pêche Prune Pomme Orange Citron
En champs et cultures maraichères	Betterave a sucre Betterave rouge Milo Colza Chou frisé Coton	Luzerne Lin Tomate Asperge Millet Sorgho (grain) Orge (grain) Seigle (grain) Avoine (grain) Riz	Cantaloup Laitue Tournesol Carotte Epinard Courge Oignon Poivre Blé (grain)	Vesce Pois Céleri Chou Artichaut Aubergine Patate douce Pomme de terre Haricots verts
Cultures fourragères	Alkali sacation Prés salés Nuttall alkali Bermuda Rhodes Fétuque Seigle sauvage du Canada Seigle sauvage sans barbe Herbe de blé de l'Ouest	Trèfle blanc Trèfle jaune Seigle four-rager vivace Mountain brome Orge (foin) Trèfle ornithope Trèfle fraise Herbe Dallis Herbe Sudan Trèfle Hubam Luzerne (commune de Californie) Tall fescue Seigle (foin)	Blé (foin) Avoine (foin) Herbe de verger Gramma bleu Prairie Roseau canari Trèfle géant Smooth brome Prairie à herbe d'avoine Vesce laiteuse Cicer Trèfle acide Vesce laiteuse faucille	Trèfle blanc hollandais Prairie foxtail Trèfle Alsike Trèfle rouge Trèfle Ladino Pimprenelle

TDN n°3 : Exemple de calcul des besoins de lessivage

Exercice 1 :

Soit une culture de maïs irrigué à la raie. Le sol est un limon homogène, et l'eau d'irrigation a une salinité $EC_w = 1.1 \text{ dS.cm}^{-1}$.

L'évapotranspiration de la culture, $ETM = 800 \text{ mm}$ par Saison. L'efficience des irrigations est $E = 0.65$.

- Quelle est la quantité supplémentaire d'eau à apporter pour lessiver ?
- On considérera un rendement potentiel de la culture de 100 %