



MICROFICHE N°

04012

République Tunisienne

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية
وزارة الزراعة

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي
تونس

F 1

RAPPORT DE STAGE

Principes et applications
du drainage

(16 Août - 2 Décembre 1976 aux Pays Bas)

A. Hami., Ingénieur Principal, Division des Sois

AVANT PROPOS.

Le contrôle des périmètres irrigués constitue une des activités de la Division des Soles. Or la compréhension du comportement des sols, de leur évolution sous irrigation et de leur influence sur les cultures est souvent très liée à la connaissance de la nappe phréatique et donc aux conditions de drainage.

C'est donc dans ce cadre que j'ai effectué un stage du 16 août au 2 décembre 1976 aux Pays Bas. Ce stage a été organisé par les deux établissements suivants :

- "International Agricultural Center"
- "International Institute for land Reclamation and Improvement"

Il consiste en un cours international sur le drainage qui a lieu chaque année et qui groupe des représentants de plusieurs pays.

Introduction au cours.

Le drainage, qui peut assurer une meilleure aération du sol et permet de maîtriser la salinité de celui-ci, acquiert de plus en plus d'intérêt de par le monde. Des sols, jugés bien drainés il y a une trentaine d'années, peuvent avoir actuellement besoin d'un système de drainage plus intensif étant donné le haut niveau de productivité exigé de nos jours.

Dans les régions humides, l'accent est mis sur le drainage, c'est à dire sur l'évacuation de l'excès d'eau, dans les régions arides c'est l'apport d'eau pour les plantes qui est pris en considération. Toutefois, l'irrigation et le drainage sont tous deux nécessaires habituellement et ceci à cause des conditions climatiques irrégulières et à cause du fait que l'introduction de l'irrigation entraîne inévitablement un excès d'eau qui ne peut pas être toujours évacué dans de bonnes conditions par drainage naturel.

Le terme "drainage" utilisé dans ce cours se rapporte aux opérations suivantes :

- évacuer tout excès d'eau qui se manifeste à la surface ou à l'intérieur du sol (drainage superficiel et sous-sol)
- empêcher autant que possible l'entrée d'un excès d'eau à l'intérieur d'une zone, à la surface du sol ou à l'intérieur de celui-ci (drainage d'interception)
- évacuer l'excès d'eau collecté dans la zone considérée (drainage principal).

La préparation d'un système de drainage peut être subdivisée en deux étapes

- la conception
- l'installation.

Pour l'étape "conception" une quantité considérable d'information doit être collectée au moyen d'investigations sur le terrain faisant appel à différentes sciences : hydrologie, physique, botanique, chimie, pédologie, géodésie... Durant le cours, l'accent est mis essentiellement sur cette étape.

En ce qui concerne l'étape "installation", l'étude des systèmes de drainage couverts et les nouvelles idées relatives au drainage sont étudiés avec beaucoup d'attention.

Par contre l'étude des aspects techniques des cours d'eau à ciel ouvert ne reçoit pas d'attention particulière.

Les différents sujets traités sont publiés en quatre volumes.

- Le volume I : décrit les éléments de base, les lois physiques et les principes du système eau-sol-plante dans lequel le drainage prend place.

- Le volume II : présente les théories et les formulations mathématiques de l'écoulement de l'eau et formule les objectifs du drainage.

- Le volume III : discute les différentes techniques d'étude et d'investigation pour déterminer les paramètres du système eau-sol-plante dont il doit être tenu compte dans la conception du système de drainage.

- Le volume IV : concerne la conception, l'installation et la maintenance des systèmes de drainage.

D'autre part, tenant compte du fait que les participants proviennent de régions différentes et ont des profils différents, nous avons à choisir deux des quatre sujets spécialisés suivants

- d'une part

- systèmes de drainage principaux (1)
- ou • détermination de l'humidité du sol (2)

- d'autre part

- drainage des zones tropicales basses (3)
- ou • lessivage des sels (4)

J'ai choisi, pour ma part, les sujets (2) et (4)

1.- Sujets introductifs.

1.- Hydrologie de différents types de plaines.

Ceci comporte un bref rapport sur les principales caractéristiques géomorphologiques et géogénétiques de différents types de plaines et les caractéristiques des nappes phréatiques correspondantes. Ce paragraphe traite notamment des aspects suivants :

- hydrologie et drainage
- classification des couches contenant l'eau
- différents types de plaines (plaines alluviales, côtières, glaciaires, lacustres...)
- caractéristiques de la nappe dans des zones affectées par la dissolution
- influence des failles.

2.- Les sols et leurs propriétés.

Les caractéristiques physiques et chimiques des sols, qui sont en relation avec l'eau et la plante, sont traitées dans ce paragraphe. Ce sont notamment :

- les caractéristiques pédologiques de base
- les propriétés physiques

- d'une part

- systèmes de drainage principaux (1)
- ou • détermination de l'humidité du sol (2)

- d'autre part

- drainage des zones tropicales basses (3)
- ou • lessivage des sels (4)

J'ai choisi, pour ma part, les sujets (2) et (4)

1.- Sujets introductifs.

1.- Hydrologie de différents types de plaines.

Ceci comporte un bref rapport sur les principales caractéristiques géomorphologiques et géogénétiques de différents types de plaines et les caractéristiques des nappes phréatiques correspondantes. Ce paragraphe traite notamment des aspects suivants :

- hydrologie et drainage
- classification des couches contenant l'eau
- différents types de plaines (plaines alluviales, cotières, glaciaires, lacustres...)
- caractéristiques de la nappe dans des zones affectées par la dissolution
- influence des failles.

2.- Les sols et leurs propriétés.

Les caractéristiques physiques et chimiques des sols, qui sont en relation avec l'eau et la plante, sont traitées dans ce paragraphe. Ce sont notamment :

- les caractéristiques pédologiques de base
- les propriétés physiques

- l'humidité du sol
- l'air et le sol
- la température du sol
- la fertilité et la productivité

3.- Les sols salés

Un bref rappel est donné sur les problèmes des sols salés leur origine, leur manifestation et leur amélioration. Le drainage des sols salés est discuté plus longuement dans le volume II.

4.- Croissance des plantes en relation avec le drainage

La relation entre la croissance de la plante, le développement des racines et les conditions d'humidité du sol sont décrites en général. D'une manière plus détaillée, sont discutées les effets du niveau de la nappe et du drainage sur les conditions du sol et sur le comportement des plantes (drainage et conditions physiques du sol, drainage et pratiques culturales, drainage et disponibilité en éléments nutritifs, drainage et salinité, niveau de la nappe et production végétale: arbres fruitiers, prairies, autres...)

5.- Etude physique de l'humidité du sol

Les forces, agissant sur l'eau dans un sol non saturé, sont discutées. La rétention et le mouvement de l'eau du sol sont décrits.

Ainsi les notions suivantes sont présentées :

- la capacité au champ et le point de flétrissement
- les mécanismes de rétention de l'eau par le sol et les courbes de rétention
- les équations de transport de l'eau basées sur le principe du potentiel

- l'infiltration
- la capillarité.

6.- Notions élémentaires d'hydraulique concernant la nappe.

Les lois physiques fondamentales concernant l'écoulement de la nappe, les équations hydrauliques de base, les approximations correspondantes et les solutions approchées utilisées en hydrologie appliquée de la nappe, sont discutées et illustrées par quelques exemples.

7.- Modèles électriques.

L'analogie qui existe entre l'écoulement de la nappe et celui de l'électricité permet d'obtenir des solutions, au problème relatif au premier phénomène à partir de modèles électriques.

Cette analogie est traitée et un exemple est donné sur l'application du système utilisant le papier conducteur dans des conditions simples.

II.- Théories du drainage et de l'écoulement de l'eau.

1.- Écoulement sous-terrain de l'eau dans les drains.

Ce paragraphe traite des principes et des applications de quelques équations généralement utilisées pour l'écoulement sous-terrain vers un système de fossés ou de tuyaux parallèles dans les conditions d'état uniforme ou variable.

1-1.- État uniforme

- écoulement horizontal vers des drains atteignant l'horizon imperméable.
- Principes des équations de Hooghoudt, de Kirkham, de Degan et de Ernst et leurs applications
- Monographies généraux.

1-2.- Etat variable.

- principes, explications et discussions des équations de Glover-Dunn et de Kreijenhoff.

2.- Bilan des sels et besoin en lessivage.

Ceci correspond à l'un des deux sujets spécialisés que j'ai choisis

Il traite du bilan des sels dans le sol sous l'influence du lessivage par l'eau d'irrigation. Le besoin en lessivage, pour maintenir un bilan de sels favorable, est calculé dans différentes conditions d'irrigation.

Ainsi les principaux points traités sont :

2-1.- Salinisation et drainage.

2-2.- Le bilan des sels.

- l'eau et le bilan des sels dans la zone racinaire
- l'efficacité du lessivage
- l'équation d'équilibre des sels et le besoin en lessivage
- l'équation d'emménagement des sels
- les équations d'équilibre et d'emménagement des sels exprimées en termes de conductivité électrique.

2-3.- Exemples de calculs.

- sols irrigués de façon permanente et en l'absence de capillarité
- sols irrigués de façon saisonnière avec manifestation de capillarité durant la période de non irrigation
- alcalinité et lessivage

2-4.- L'influence de sels peu solubles contenues dans l'eau d'irrigation.

- la solubilité de ces sels
- classification de l'eau d'irrigation en tenant compte des taux de bicarbonate et de gypse
- ajustement des équations
- exemple d'eau d'irrigation contenant du gypse
- exemple d'eau d'irrigation contenant du carbonate de calcium
- exemple d'eau d'irrigation contenant du bicarbonate de sodium.

2-4.- L'assivage de sols salés.

- le réservoir simple
- le réservoir avec by-pass
- les séries de réservoirs
- les colonnes continues
- exemples de calculs
- l'assivage de sols au dessous de la nappe phréatique.

3.- Relation irrigation-drainage.

des

Une brève discussion/relations existant entre l'irrigation et le drainage est faite. Les points traités sont :

- le contrôle de l'irrigation
- les pertes provoquées dans les canaux d'irrigation
- l'application de l'eau d'irrigation
- les méthodes d'irrigation
- l'effet positif d'un excès d'irrigation
- réutilisation de l'eau de drainage
- la décharge dans les canaux de drainage due à l'eau d'irrigation.

2-4.- L'influence de sels peu solubles contenus dans l'eau d'irrigation.

- la solubilité de ces sels
- classification de l'eau d'irrigation en tenant compte des taux de bicarbonate et de gypse
- ajustement des équations
- exemple d'eau d'irrigation contenant du gypse
- exemple d'eau d'irrigation contenant du carbonate de calcium
- exemple d'eau d'irrigation contenant du bicarbonate de sodium.

2-4.- Lessivage de sols salés.

- le réservoir simple
- le réservoir avec by-pass
- les séries de réservoirs
- les colonnes continues
- exemples de calculs
- lessivage du sol au dessous de la nappe phréatique.

3.- Relation irrigation-drainage.

Une brève discussion ^{des} relations existant entre l'irrigation et le drainage est faite. Les points traités sont :

- le contrôle de l'irrigation
- les pertes provoquées dans les canaux d'irrigation
- l'application de l'eau d'irrigation
- les méthodes d'irrigation
- l'effet positif d'un excès d'irrigation
- réutilisation de l'eau de drainage
- la décharge dans les canaux de drainage due à l'eau d'irrigation.

4.- Les critères utilisés en drainage.

Ces critères sont formulés en termes de décharge des drains, de contrôle de la profondeur de la nappe et de la salinité. L'approche est basée sur les conditions d'état uniforme ou variable.

La réponse à la question "De combien doit on réduire l'embmagasinage de l'eau dans le sol" nous amène à penser au problème des critères à utiliser pour la conception d'un système de drainage. L'effet du système de drainage sur l'embmagasinage et sur le bilan de l'eau peut être appelé effet direct ou primaire.

Les effets du drainage sur la production agricole (effets indirects ou secondaires) sont multiples et dépendent du climat, du sol et de la végétation. :

- Effets physiques :

- aération du sol
- structure du sol
- température du sol
- travail du sol
- résistance du sol

- Effets bio-chimiques.

- respiration des plantes
- profondeur de l'enracinement
- disponibilité en éléments nutritifs
- minéralisation du sol
- salinité et alcalinité du sol.

Etant donné l'insuffisance des recherches relatives au système : conditions de drainage - conditions physiques et chimiques du sol - production agricole, le type d'information

la plus utilisable pour la conception du système de drainage consiste en des relations, obtenues empiriquement, entre le régime de la nappe et la production agricoles dans les conditions naturelles (quelques exemples sont présentés)

Le critère à employer dans ces conditions peut être différencié en tenant compte des caractéristiques suivantes :

- La manière selon laquelle il est établi (en relation avec le rendement ou en tenant compte de considérations économiques).
- La nature du système de drainage en considération (de surface, sous-terrain ou dans le cas de collecteurs)
- La fréquence de dépassement tolérée (si le critère tient compte de niveau moyen ou bien de niveau exceptionnellement élevé de la nappe).

4.- Ecoulement vers des puits.

Les puits jouent un rôle important non seulement pour obtenir l'eau pour des besoins domestiques, industriels ou d'irrigation mais aussi pour abaisser le niveau de la nappe.

Un certain nombre d'équations sont discutées dans ce chapitre. Ces équations peuvent être utilisées pour :

- prédire l'abaissement de la nappe dans des conditions uniformes ou variables pour un débit connu à partir d'un aquifère dont les propriétés hydrauliques sont connues
- pour calculer les propriétés hydrauliques d'un aquifère à partir de résultats d'essais de pompage, c'est à dire à partir de la mesure du débit du puits et de l'abaissement de la nappe à différentes distances (volume II)
- pour calculer¹⁰ le débit nécessaire à utiliser pour les besoins du drainage et l'espacement des puits.

5.- Infiltration ou "asepege".

C'est l'écoulement de l'eau dans le sol, c'est aussi de l'eau celui/qui quitte le sol (vers un fossé, à travers une digue en terre) ou y entrant (à partir de canaux ou de fossés)

Les points suivants sont traités :

- infiltration à partir des canaux vers des aquifères semi-libres
- écoulement à partir des fossés vers la nappe phréatique et inverse
- ondes de transmission
- pertes d'eau à partir des fossés vers la nappe

6.- Drainage par puits.

Quelques aspects théoriques et pratiques du drainage par puits sont présentés.

- avantages et désavantages
- critères concernant la nappe et le débit
- interinfluence des puits
- développement de la pression hydraulique durant de courtes périodes de pompage
- Puits de drainage dans le cas d'aquifères semi-libres

7.- Relations entre les précipitations et l'écoulement superficiel des eaux modèles de calcul.

C'est l'écoulement de l'eau dans les canaux. Il comprend en gros l'eau de ruissellement et celle déversée dans les canaux et provenant de la nappe. La première composante est la cause de base et sa contribution aux inondations est minime bien que, dans beaucoup de régions, elle représente le plus grand pourcentage de l'écoulement annuel dans les canaux.

Les principaux sujets traités dans ce chapitre :

- La zone de réception (le sol, la superficie, le pont, la configuration du système de canalisation)

- l'application de systèmes en hydrologie
 - le système hydrologique
 - l'approche physique
 - l'approche empirique
 - les méthodes statistiques
 - les systèmes linéaires
 - les modèles de synthèse ou simulations
- Précipitation et précipitation effective, détermination des pertes.
 - méthodes concernant l'étude de l'infiltration
 - les analyses de corrélation
 - la méthode du "curve number"
 - comparaison des deux méthodes
- Méthode de l'hydrographie
- Les modèles de synthèse
- L'expérience des Pays bas.

8.- Analyses hydrographiques pour des zones où prédomine un ruissellement à partir de la nappe.

Ce chapitre décrit comment les paramètres du modèle précipitation-ruissellement peuvent être dérivés à partir d'hydrographes de décharge observés dans différents bassins aux Pays Bas ; les principes de base ayant été décrits au paragraphe précédent.

III.- Etudes et investigations.

Ce volume traite des méthodes appliquées aux analyses des données pluviométriques et à la détermination de l'évapotranspiration.

D'autre part, les études pédologiques habituelles ne fournissent pas de bases adéquates pour la conception du drainage. Des études supplémentaires ou spéciales sont généralement nécessaires pour déterminer certaines propriétés hydrologiques du sol telles que les vitesses d'infiltration, propriétés hydrologiques du sol telles que les vitesses d'infiltration et de percolation, l'emmagasinement de l'eau dans le sol,

le mouvement de la nappe à travers les couches de sol.

De plus les éléments du base, pour l'étude de la nappe dans le but du drainage, y sont présentes.

1.- Les études et leur enchainement.

Pour arriver à une réponse finale concernant la faisabilité technique et économique d'un projet de drainage, une série d'études de plus en plus détaillées est généralement requise. En général les études sont faites aux trois niveaux suivants :

- étude de reconnaissance
- étude semi-détaillée
- étude détaillée

2.- Analyses de la pluviométrie.

Pour la conception des travaux de contrôle du drainage et des inondations, les quantités d'eau qui seront déchargées doivent être connues. Si cela ne peut être fait directement, des méthodes indirectes, telles que l'analyse de la pluviométrie, doivent être utilisées. Ce chapitre concerne principalement la collecte des données pluviométriques et l'utilisation de certaines techniques statistiques qui permettent de sélectionner un modèle pluviométrique.

3.- Détermination de l'évapotranspiration.

Pour calculer la quantité d'eau qui correspondra à la percolation profonde, on doit connaître l'évapotranspiration potentielle exprimée en cm par jour mois calculée généralement en tant que valeur moyenne mensuelle et ce notamment dans les zones irriguées.

Pour cela quelques méthodes utilisées pour le calcul de l'E.T.P. sont présentées :

- Méthode basée sur des considérations énergétiques
- Méthodes basées sur des relations empiriques

Ceci conduit aux différentes formules de calcul de l'évapotranspiration potentielle (Penman, Turc, Jensen et Haise, Blaney et Criddle, Thornthwaite).

La formule développée par Penman semble être la plus appréciée aux Pays Bas, l'argument principal étant le fait qu'elle est celle qui est la plus basée sur des constantes physiques et qu'ainsi elle peut mieux être adaptée à différentes régions climatiques.

4.- Etudes hydrogéologiques.

Une étude hydrogéologique doit répondre aux questions suivantes :

- où se manifeste les zones qui souffrent de mauvaises conditions relatives à la nappe et quelles sont les causes?
- Est-ce que l'excès d'humidité des sols a une influence sur le labour, la croissance des plantes, la récolte?
- quels sont les types de régions qui souffrent de mauvaises conditions de sol (salinité) et quelles sont les relations, s'il en existe, entre de telles conditions et celles de l'eau superficielle et sous-terreine?

Est-ce qu'on peut remédier à ces mauvaises conditions?

- quelles sont les propriétés du sol qui influencent l'écoulement de l'eau et qui peuvent indiquer si le contrôle de la nappe constitue une opération économique ?
- quelles sont les caractéristiques topographiques, morphologiques de la région considérée? Est-ce qu'il est possible d'évacuer l'excès d'eau et quelles sont les conditions de l'émission ?

- quels effets pourra avoir un drainage artificiel sur les sols et leur productivité ?

A partir de cela les cartes suivantes doivent être produites :

- carte de texture pour des profondeurs de sol de 2 à 5 m.
- une carte du niveau supérieur de la couche imperméable
- une carte montrant la localisation, l'étendue et l'épaisseur des couches perméables au niveau ou au dessous des drains.
- une carte montrant l'épaisseur de la couche ou des couches transmettant l'eau.
- une carte de salinité
- une carte de profondeur de la nappe
- une carte de fluctuations de la nappe (basée sur les caractéristiques hydromorphiques du sol)
- une carte de la salinité de la nappe
- une carte de la conductivité hydraulique pour les couches situées au dessus et au dessous de la nappe, spécialement au niveau et au dessous des drains
- une carte montrant l'importance et les variations de l'infiltration
- une carte d'occupation des sols

5.- Analyses des données relatives à la nappe

Les principaux éléments d'une étude de la nappe sont

5-1.- La collecte des données

Pour la collecte des données, on est intéressé à l'étendue et à l'importance du problème de drainage ; on souhaite connaître où et quand les niveaux de la nappe sont élevés. Mais pour résoudre d'une façon efficace le problème de drainage on a aussi besoin de connaître ses causes. Pour cela il est nécessaire de connaître les facteurs qui exercent une influence sur le comportement de la nappe et la meilleure manière de faire cela est d'établir un bilan de l'eau sous-terrainne.

5-2.- Présentation des données.

Ceci comporte :

- la présentation des données sous une forme spéciale (enregistrement des données)
- la représentation des niveaux de la nappe en fonction du temps (hydrographes piézométriques)

Présentation des données relatives au niveau et à la qualité de la nappe sous forme de cartes

- cartes des contours de la nappe et surface potentiométrique
- cartes de profondeurs de la nappe
- cartes de fluctuation de la nappe
- cartes montrant la différence de pression entre la nappe et la surface potentiométrique
- cartes de la qualité de la nappe.

5-3.- Interprétation des données

- Hydrographes :

Leur étude permet de les arranger en groupes correspondant à leur aspect de fluctuation. Chaque groupe représente une zone où les variations de la nappe (ou surface potentiométrique) sont reliées aux composantes d'apport ou de départ du système et de ce fait les variations dues à ces composantes peuvent être prédictes.

- Cartes de contour de la nappe.

Ces cartes permettent d'obtenir les caractéristiques suivantes :

- direction de l'écoulement
- gradient hydraulique ($i = \frac{dh}{dx}$)
- dépressions
- courants affluents ou effluents
- résistance réelle

5-2.- Présentation des données.

Ceci comporte :

- la présentation des données sous une forme spéciale (enregistrement des données)
- la représentation des niveaux de la nappe en fonction du temps (hydrographes piézométriques)

Présentation des données relatives au niveau et à la qualité de la nappe sous forme de cartes

- cartes des contours de la nappe et surface potentiométrique
- cartes de profondeurs de la nappe
- cartes de fluctuation de la nappe
- cartes montrant la différence de pression entre la nappe et la surface potentiométrique
- cartes de la qualité de la nappe.

5-3.- Interprétation des données

- Hydrographes :

Leur étude permet de les arranger en groupes correspondant à leur aspect de fluctuation. Chaque groupe représente une zone où les variations de la nappe (ou surface potentiométrique) sont reliées aux composantes d'apport ou de départ du système et de ce fait les variations dues à ces composantes peuvent être prédictes.

- Cartes de contour de la nappe.

Ces cartes permettent d'obtenir les caractéristiques suivantes :

- direction de l'écoulement
- gradient hydraulique ($i = \frac{dh}{dx}$)
- dépressions
- courants affluents ou effluents
- résistance radiale

- l'utilisation de l'écoulement/^{net} permet de calculer la vitesse de recharge de la nappe
- autres types de cartes de la nappe

Elles permettent de localiser les zones de recharge et de recharge, d'étudier la variation de la quantité d'eau emmagasinée pour une période donnée, l'écoulement vertical à travers des couches semi-perméables, la salinité du sol, le bilan des sols et les besoins en lessivage.

6.- Détermination des bilans de la nappe.

Ceci est d'une grande importance car il permet de connaître les causes relatives au problème de drainage en termes quantitatifs.

Les principales caractéristiques de ce bilan peuvent être résumées ainsi :

- Il peut être déterminé pour n'importe quel sous-système du cycle hydrologique, pour n'importe quelle superficie pour n'importe quelle période
- Il permet de vérifier si toutes les composantes de l'écoulement ont été prises en considération.
- Il peut servir à calculer l'une des inconnues de l'équation si les autres variables sont connues d'une façon suffisamment précise.
- Il peut être considéré comme un modèle du processus hydrologique complet étudié et peut donc servir à prédire l'effet de la variation de certaines des composantes sur les autres

Ce chapitre englobe les points suivants :

6-1.- L'étude de l'équation du bilan de la nappe

- bilan de l'eau dans la zone non saturée
- bilan de l'eau dans le système de l'eau superficielle
- influence d'aquifères semi libres

- influence d'un écoulement sous-terrain latéral
- variations dans l'emmagasinage de l'eau sous-terrainne.

6-2.- Solution de l'équation.

- percolation et capillarité
- écoulement sous-terrain net vers l'intérieur
- écoulement sous-terrain vers l'extérieur et perte dans les courants d'eau.
- variations dans l'emmagasinage de l'eau sous-terrainne.

6-3.- Présentation d'exemples.

7.- Mesure de l'humidité et détermination au laboratoire de la conductivité hydraulique du sol

Ceci correspond au deuxième sujet spécialisé que j'ai choisi.

Nous avons déterminé au laboratoire les courbes de p_f et les conductivités hydrauliques de 6 types de sol (sol à fort pourcentage de matière organique, sol argilo-sableux, sol sableux de dune, sol limoneux et deux autres types de sols sableux).

7-1.- Détermination des courbes de p_f .

Pour les déterminations des courbes de p_f on a utilisé pour la gamme de p_f 0 - 2,7 la méthode du bac de sable et pour les p_f 2,4 et 4,2 la presse à membrane.

7-2.- Détermination de la conductivité hydraulique.

Deux méthodes de laboratoire ont été utilisées

- la méthode du perméamètre
- la méthode de la colonne de terre

D'autre part des méthodes corrélatives ont été mentionnées :

- la méthode des courbes de p_f ou de la distribution de la taille des pores qui est basée sur les lois de Poiseuille et Darcy et décrit la relation qui existe entre K et le gradient hydraulique pour un pore capillaire cylindrique. Une valeur moyenne de K peut être estimée à partir de la courbe de p_f .

Mais cette méthode ne peut être appliquée qu'à des sols ayant une structure diffuse tels que les sols sableux pour lesquels elle ne donne d'ailleurs qu'un ordre de grandeur de K et non une valeur exacte.

- la méthode de la surface spécifique ou de la distribution de la taille des particules dont le principe est similaire à celui de la première. La seule différence est le fait que la taille des pores n'est plus reliée à la pression capillaire mais à la surface spécifique des particules de sol.

Cette méthode ne peut être utilisée pour la détermination de K que lorsque d'autres techniques ne s'avèrent pas possibles. Elle est généralement utilisée pour estimer la conductivité hydraulique des couches profondes et épaisses des aquifères et donne un ordre de grandeur. Elle doit être utilisée de préférence en même temps qu'un essai de pompage pour l'obtention de la transmissivité ($K.D$).

B.- Détermination de la conductivité hydraulique au terrain

Un certain nombre de méthodes de détermination ont été faites sur le terrain et discutées :

- méthode de l'"anger hole" } au dessous de la nappe
- méthode piézométrique }

D'autre part des méthodes corrélatives ont été mentionnées :

- la méthode des courbes de pf ou de la distribution de la taille des pores qui est basée sur les lois de Poiseuille et Darcy et décrit la relation qui existe entre K et le gradient hydraulique pour un pore capillaire cylindrique. Une valeur moyenne de K peut être estimée à partir de la courbe de pf .

Mais cette méthode ne peut être appliquée qu'à des sols ayant une structure diffuse tels que les sols sableux pour lesquels elle ne donne d'ailleurs qu'un ordre de grandeur de K et non une valeur exacte.

- la méthode de la surface spécifique ou de la distribution de la taille des particules dont le principe est similaire à celui de la première. La seule différence est le fait que la taille des pores n'est plus reliée à la pression capillaire mais à la surface spécifique des particules de sol.

Cette méthode ne peut être utilisée pour la détermination de K que lorsque d'autres techniques ne s'avèrent pas possibles. Elle est généralement utilisée pour estimer la conductivité hydraulique des couches profondes et épaisses des aquifères et donne un ordre de grandeur. Elle doit être utilisée de préférence en même temps qu'un essai de pompage pour l'obtention de la transmissivité ($K.D$).

3.- Détermination de la conductivité hydraulique au terrain

Un certain nombre de méthodes de détermination ont été faites sur le terrain et discutées :

- méthode de l'"angor hole"
- méthode piézométrique

} au dessous de la nappe

- méthode de double tube
 - méthode de l'infiltromètre
 - méthode de porchet
- } au dessus de la nappe

Bien que sur le terrain les valeurs de la conductivité hydraulique trouvées avec les différentes méthodes montrent certaines imprécisions, elles sont de loin préférables à celles faites au laboratoire. Celles-ci nécessitent en effet un grand nombre d'échantillons afin d'obtenir des valeurs significatives

9.- Obtention des caractéristiques de l'aquifère à partir d'un essai de pompage.

Le principe de la méthode est simple : de l'eau est pompée pendant un certain temps avec un débit donné. L'effet de ce pompage sur la nappe est mesuré à côté du puits et à un certain nombre d'autres puits d'observation situés dans le voisinage. Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère peuvent alors être trouvées en substituant, dans une formule appropriée, l'abaissement de la nappe mesuré dans les puits d'observation, leur distance à partir du puits principal et le débit :

Malgré en réalité un essai de pompage est difficile à conduire pour des raisons techniques et surtout financières.

Une fois l'essai de pompage terminé, un rapport doit être rédigé. Ce rapport doit contenir :

- une carte montrant la localisation de l'essai
- une section du site, basée sur des données lithologiques
- si nécessaire une description ou des graphes, illustrant les corrections faites sur les mesures,
- une conclusion concernant le type d'aquifère et les considérations dont il a été tenu compte dans le choix des méthodes analytiques utilisées
- des graphiques dont les courbes de l'abaissement de la nappe en fonction du temps
- les valeurs des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère et des couches qui le limitent en même temps qu'une discussion sur leur degré d'exactitude

- méthode de double tube
 - méthode de l'infiltromètre
 - méthode de porchet
- } au dessus de la nappe

Bien que sur le terrain les valeurs de la conductivité hydraulique trouvées avec les différentes méthodes montrent certaines imprécisions, elles sont de loin préférables à celles faites au laboratoire. Celles-ci nécessitent en effet un grand nombre d'échantillons afin d'obtenir des valeurs significatives

9.- Obtention des caractéristiques de l'aquifère à partir d'essais de pompage.

Le principe de la méthode est simple : de l'eau est pompée pendant un certain temps avec un débit donné. L'effet de ce pompage sur la nappe est mesuré à côté du puits et à un certain nombre d'autres puits d'observation situés dans le voisinage. Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère peuvent alors être trouvées en substituant, dans une formule appropriée, l'abaissement de la nappe mesuré dans les puits d'observation, leur distance à partir du puits principal et le débit :

Mais en réalité un essai de pompage est difficile à conduire pour des raisons techniques et surtout financières.

Une fois l'essai de pompage terminé, un rapport doit être rédigé. Ce rapport doit contenir :

- une carte montrant la localisation de l'essai
- une section du site, basée sur des données lithologiques
- si nécessaire une description ou des graphes, illustrant les corrections faites sur les mesures,
- une conclusion concernant le type d'aquifère et les considérations dont il a été tenu compte dans le choix des méthodes analytiques utilisées
- des graphiques dont les courbes de l'abaissement de la nappe en fonction du temps
- les valeurs des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère et des couches qui le limitent en même temps qu'une discussion sur leur degré d'exactitude

- si nécessaire, des recommandations pour d'autres investigations
- un résumé des résultats obtenus.

10.- Détermination des constantes hydrologiques à partir d'essais expérimentaux sur le terrain.

La mesure des constantes hydrologiques telles que la conductivité hydraulique de la couche supérieure, la transmissivité de l'aquifère et la porosité effective a été discutée aux chapitres 7 et 9. Dans ce cas le volume de sol qui est intéressé est généralement petit et de ce fait un grand nombre de mesures est nécessaire, mais en pratique ceci n'est souvent pas fait. Ainsi il est souhaitable -et quelques fois indispensable- de procéder à des expérimentations de terrain pour vérifier ces premières estimations. Ces expérimentations peuvent en même temps servir à recueillir des informations sur les facteurs influençant le bilan de l'eau, la profondeur adéquate de la nappe, l'adaptation du système d'irrigation, l'efficacité du lessivage. Elles peuvent être aussi utilisées pour tester le matériel (tuyaux, filtres).

Ce chapitre comprend :

- le choix du site, des dimensions de la parcelle expérimentale et des parcelles élémentaires et l'arrangement de ces dernières
- les observations à faire (le débit des drains, la profondeur de la nappe) et leur fréquence
- l'analyse des résultats pour la détermination des constantes hydrologiques.

IV.- Conception et conduite des systèmes de drainage.

Les sujets qui ont été étudiés dans ce volume sont :

- 1.- Systèmes de drainage sous-terrain
- 2.- Systèmes de drainage de surface

- 3.- Drainage de sols en pente
- 4.- Contrôle chimique des plantes aquatiques
- 5.- Maintenance mécanique des fossés
- 6.- Drainage de sols argileux lourds
- 7.- Procédures utilisées dans les études de drainage
- 8.- Conduites des projets de drainage
- 9.- Evaluation économique

D'autres chapitres existent mais ne sont pas mentionnés ici soit parce qu'ils ont fait l'objet d'études dans le cadre d'autres groupes spécialisés (systèmes de drainage principaux et drainage des rizières), soit parce qu'ils ont fait l'objet d'excursions (drainage de sédiments marins argileux nouvellement restaurés), soit enfin parce qu'ils n'ont pas fait l'objet de cours et qu'ils sont simplement traités dans le volume IV (Drainage de sols en pente, procédures utilisées dans les études de drainage, organisation administrative des projets de drainage).

1.- Réseau secondaire de drainage sous-terrain.

Ce réseau comprend les latéraux (au niveau de la ferme) et les collecteurs secondaires.

Il peut être constitué :

- de fossés
- de galeries sous-terraines
- de tuyaux en poterie, en ciment ou en plastique placés à une certaine profondeur

Si dans le système les latéraux sont constitués de tuyaux et les collecteurs sont des fossés, il est appelé système singulier de drainage en tuyaux.

Si les collecteurs aussi sont constitués de tuyaux, il est appelé système composé de drainage en tuyaux.

Si les latéraux et les collecteurs consistent en fossés, il est appelé système composé de drainage en fossés.

Dans ce chapitre sont discutés les différents aspects de l'installation du réseau secondaire de drainage (conception, construction et maintenance).

1.1.- pour le système de drainage en fossés les points suivants ont été traités

- principes et conception (avantages, désavantages, espacement et profondeur, dimensions et structures auxiliaires, localisation)
- construction (carquage des alignements et des niveaux, excavation)
- maintenance

1.2.- pour celui en galeries sous-terraines

- principes et conception (conditions du sol et adaptation du terrain, topographie...)
- construction (machines, conditions requises lors de la construction, revêtement)
- maintenance

1.3.- Le cas du système de drainage par tuyaux a été traité bien plus longuement que celui des deux premiers

- Conception : pour cela les éléments suivants, devant être déterminés, ont été explicités

- l'espacement et la profondeur des latéraux, ceux-ci étant les premiers facteurs influençant le comportement de la nappe

- le diamètre et la pente des latéraux et des collecteurs, ceux-ci devant assurer l'évacuation de l'eau débitée par les latéraux

- l'arrangement des latéraux et des collecteurs, ceci devant être adapté aux conditions particulières de la zone et notamment à sa topographie

- Espacement et profondeur des latéraux

En théorie plus les drains sont profonds plus ils sont espacés. Toutefois, en pratique, il y a un certain nombre de restrictions dont il faut tenir compte dans la détermination de la profondeur des drains

- Diamètres et pentes : ceci doit répondre aux questions suivantes
- Quelle est la zone qui peut être drainée par un tuyau de diamètre et pente donnés, assumant un certain débit spécifique
- quel est le diamètre nécessaire pour un tuyau de longueur donnée et pour une pente, un espacement et un débit spécifique donnés

Afin de répondre à cela, on doit considérer les éléments suivants :

- les équations d'écoulement de base (écoulement uniforme) pour différents types de tuyau (en poterie, en plastique...)
- des équations d'écoulement qui tiennent compte du fait que l'écoulement dans le tuyau croît dans la direction du courant étant donné que le drain prend l'eau sur toute sa longueur (écoulement non uniforme).
- un coefficient de sécurité pour tenir compte d'une certaine diminution de la capacité due à un certain degré de sédimentation.
- un drain composé de sections de diamètre croissant dans la direction du courant
- arrangement des latéraux et des collecteurs
 - différents types de systèmes et modèles
 - sélection de système
 - arrangement et localisation des drains
- matériaux utilisés
 - les différents types de matériaux utilisés dans la fabrication des tuyaux sont l'argile le ciment ou le plastique

En théorie plus les drains sont profonds plus ils sont espacés. Toutefois, en pratique, il y a un certain nombre de restrictions dont il faut tenir compte dans la détermination de la profondeur des drains

- Diamètres et pentes : ceci doit répondre aux questions suivantes
 - Quelle est la zone qui peut être drainée par un tuyau de diamètre et pente donnés , assurant un certain débit spécifique
 - quel est le diamètre nécessaire pour un tuyau de longueur donnée et pour une pente, un espacement et un débit spécifique donnés

Afin de répondre à cela, on doit considérer les éléments suivants :

- les équations d'écoulement de base (écoulement uniforme) pour différents types de tuyau (en poterie, en plastique..)
- des équations d'écoulement qui tiennent compte du fait que l'écoulement dans le tuyau croît dans la direction du courant étant donné que le drain prend l'eau sur toute sa longueur (écoulement non uniforme).
- un coefficient de sécurité pour tenir compte d'une certaine diminution de la capacité due à un certain degré de sédimentation.
- un drain composé de sections de diamètre croissant dans la direction du courant
- arrangement des latéraux et des collecteurs
 - différents types de systèmes et modèles
 - sélection de système
 - arrangement et localisation des drains
- matériaux utilisés
 - les différents types de matériaux utilisés dans la fabrication des tuyaux sont l'argile le ciment ou le plastique

- matériaux de recouvrement pour faciliter l'écoulement de l'eau vers le drain et empêcher l'entrée de particules de sol.

- structures auxiliaires.
 - structures terminales
 - jonctions....

- Construction.

La procédure normale de construction d'un système de drainage par tuyaux consiste à :

- creuser une tranchée de profondeur et pente données
- installer les tuyaux avec ou sans matériau de recouvrement
- recouvrir la tranchée avec le sol qui a été enlevé. Cette construction peut être faite manuellement ou avec des machines appropriées.
- maintenance : elle peut être divisée en deux catégories d'actions
 - inspection régulière du système
 - remise en état de fonctionnement si nécessaire

Si le système ne fonctionne pas de façon satisfaisante, il peut y avoir différentes explications possibles :

- le drainage peut avoir été graduellement détérioré (accumulation de sédiments dans les tuyaux) ou peut avoir été déficient dès le début (conception erronée)
- le problème peut être dû à une défection dans les drains eux-mêmes ou peut être dû à une cause extérieure (couches de sol gênantes à faible profondeur ou niveau d'eau insuffisamment profond dans les fossés)

La vérification du fonctionnement du réseau de drainage peut être faite en quatre étapes par l'intermédiaire de plexomètres

1ère étape : écoulement vertical de la surface vers la nappe puis approximativement jusqu'au niveau des drains

2^{ème} étape : écoulement horizontal vers les drains et partiellement, écoulement radial au voisinage du fossé contenant le tuyau

3^{ème} étape : écoulement à partir de ce niveau vers l'intérieur du tuyau

4^{ème} étape : écoulement à l'intérieur du tuyau vers le fossé collecteur.

Dans certains cas on peut remédier à la situation par des méthodes de nettoyage des tuyaux ou par l'adjonction de tuyaux supplémentaires, dans d'autres il ne peut y avoir aucun remède.

2.- Système de drainage superficiel.

Le drainage superficiel est l'évacuation de l'excès d'eau qui se trouve à la surface du sol - quelques fois en partie dans la couche superficielle du sol - vers un système de drainage à ciel ouvert

Dans les zones plates, le problème principal est l'évacuation de l'eau stagnant dans les dépressions. Dans les zones en pente c'est habituellement l'évacuation de l'excès d'eau sans causer d'érosion.

Le cours, qui a été donné par H. Keith H. Beauchamp, expert américain en la matière, se réfère à son expérience et à celles d'autres ingénieurs et chercheurs, expériences qui ont eu pour cadre les zones humides des États Unis.

Il comprend une discussion des différentes techniques de drainage superficiel et de ses différentes composantes telles que la préparation du sol, les billons de drainage superficiel,

La vérification du fonctionnement du réseau de drainage peut être faite en quatre étapes par l'intermédiaire de piezomètres

1ère étape : écoulement vertical de la surface vers la nappe puis approximativement jusqu'au niveau des drains

2ème étape : écoulement horizontal vers les drains et partiellement, écoulement radial au voisinage du fossé contenant le tuyau

3ème étape : écoulement à partir de ce niveau vers l'intérieur du tuyau

4ème étape : écoulement à l'intérieur du tuyau vers le fossé collecteur.

Dans certains cas on peut remédier à la situation par des méthodes de nettoyage des tuyaux ou par l'adjonction de tuyaux supplémentaires, dans d'autres il ne peut y avoir aucun remède.

2.- Systèmes de drainage superficiel.

Le drainage superficiel est l'évacuation de l'excès d'eau qui se trouve à la surface du sol - quelques fois en partie dans la couche superficielle du sol - vers un système de drainage à ciel ouvert

Dans les zones plates, le problème principal est l'évacuation de l'eau stagnant dans les dépressions. Dans les zones en pente c'est habituellement l'évacuation de l'excès d'eau sans causer d'érosion.

Le cours, qui a été donné par M. Keith H. Beauchamp, expert américain en la matière, se réfère à son expérience et à celles d'autres ingénieurs et chercheurs, expériences qui ont eu pour cadre les zones humides des États Unis.

Il comprend une discussion des différentes techniques de drainage superficiel et de ses différentes composantes telles que la préparation du sol, les billons du drainage superficiel,

ainsi que quelques méthodes de calcul des débits.

Le drainage par sillons.

Les principales indications peuvent être resumées ainsi :

- Il ne doit pas y avoir de sillons qui aient des pentes inversées
- Il n'est pas nécessaire d'avoir des sillons qui aient des pentes très précisément uniformes.
- une pente minimum de 1 à 2 % est la meilleure (du moins du point de vue de la construction). Le maximum de pente (tenant compte de l'érosion) est de 5 %.
- toutes les opérations de labour doivent être faites dans la direction des sillons
- toutes les dépressions doivent être éliminées
- la terminaison des sillons doit être maintenue non obturée
- cette terminaison ne doit pas avoir une pente raide.
- la longueur des sillons variera en fonction des données édaphiques et climatiques de la zone et est souvent ajustée de façon à être adaptée au terrain, et aux opérations de nivellement

La préparation du sol.

C'est la modification du terrain, par des opérations de nivellement et d'homogénéisation, afin de le faire bénéficier des meilleures conditions de drainage, d'irrigation et de lutte contre l'érosion.

Une discussion est faite sur les différentes méthodes de préparation du sol (adaptation, conception, et exécution).

ainsi que quelques méthodes de calcul des débits.

Le drainage par sillons.

Les principales indications peuvent être resumées ainsi :

- il ne doit pas y avoir de sillons qui aient des pentes inversées
- il n'est pas nécessaire d'avoir des sillons qui aient des pentes très précisément uniformes.
- une pente minimum de 1 à 2 % est la meilleure (du moins du point de vue de la construction). Le maximum de pente (tenant compte de l'érosion) est de 5 %.
- toutes les opérations de labour doivent être faites dans la direction des sillons
- toutes les dépressions doivent être éliminées
- la terminaison des sillons doit être maintenue non obstruée
- cette terminaison ne doit pas avoir une pente raide.
- la longueur des sillons variera en fonction des données édaphiques et climatiques de la zone et est souvent ajustée de façon à être adaptée au terrain, et aux opérations de nivellement

La préparation du sol.

C'est la modification du terrain, par des opérations de nivellement et d'homogénéisation, afin de le faire bénéficier des meilleures conditions de drainage, d'irrigation et de lutte contre l'érosion.

Une discussion est faite sur les différentes méthodes de préparation du sol (adaptation, conception, et execution).

Systèmes de drainage superficiel.

Il y a essentiellement cinq types de systèmes utilisés aux U.S.A. (dans la zone moyen-occidentale). Occasionnellement, il y a lieu de combiner deux ou plusieurs systèmes afin d'assurer le maximum de sécurité. Ces cinq systèmes sont :

- le système en lits
- le système en fossés disposés au hasard
- le système en fossés parallèles
- le système en terrasses
- le système permettant en même temps de contrôler la nappe et l'eau superficielle.

Les drains.

Une description des différents drains est faite.

- canal interceptant le ruissellement au pied d'une zone en pente
- drains et collecteurs au niveau de la ferme
- latéraux
- drain d'interception de l'eau sous-terrain et superficielle
- drain annuel

Calcul des débits à fixer.

Différentes méthodes de calcul sont discutées

- zones en pente (méthode rationnelle, méthode de Cook, méthode du "curve number")
- zones plates (formules de Cypress et Creek, procédures hydrologiques simplifiées).

4.- Contrôle chimique de la végétation aquatique

Quelques fois les berges des fossés de drainage doivent être recouvertes de végétation afin d'éviter leur érosion, la croissance de végétation hydrophile à l'intérieur des fossés peut empêcher l'écoulement de l'eau.

Là où on ne peut utiliser les machines, les procédés chimiques peuvent être utilisés pour lutter contre telle végétation. Ces procédés ^{doivent être employés} avec beaucoup de précaution car ils présentent beaucoup de dangers.

Ce chapitre contient une description des types communs de végétation aquatique, leurs facteurs de croissance et les moyens chimiques et biologiques utilisés pour les combattre.

4.- Maintenance mécanique des fossés.

Elle consiste en trois actions :

- contrôle de la végétation des berges
- lutte contre la végétation aquatique
- enlèvement des dépôts

Une brève présentation des machines et outils utilisés à cet effet, est faite.

5.- Drainage des sols argileux lourds.

Le drainage traditionnel ou drainage de ce type de sols est le drainage superficiel par l'intermédiaire de sillons ou de fossés peu profonds. Il a été prouvé, cependant, que le drainage sous-sol peut avoir du succès dans le cas où il existe des couches intermédiaires ayant une grande conductivité hydraulique.

Le profil de tels types de sols (surtout dans les plaines alluviales) montre souvent trois horizons caractéristiques :

- un horizon superficiel, de 20 à 30 cm d'épaisseur ayant une conductivité hydraulique élevée (1m/jour)
- un second horizon d'épaisseur variable (50 à 100cm) de faible conductivité hydraulique (quelques centimètres par jour au plus)

- un troisième horizon à une profondeur variable et ayant une conductivité hydraulique moyenne à élevée

Le troisième horizon est très important pour la faisabilité d'un système de drainage sous-terrain. S'il existe à une profondeur acceptable, il peut, en combinaison avec l'horizon superficielle très perméable, être avantageusement utilisé pour drainer le sol.

La solution consiste à combiner un drainage superficiel et un drainage sous-terrain.

Quelques fois aussi le drainage coupe peut constituer une solution satisfaisante.

Les principes et les applications de tels types de drainage sont discutés.

6.- Evaluation économique.

Ces chapitres traitent l'aspect économique des projets d'irrigation et de drainage, illustré par quelques exemples (projet d'irrigation en Thaïlande, projet d'irrigation en Afrique orientale).

CONCLUSIONS

Ce rapport n'est, en fait, qu'une présentation sommaire de tout ce qui a été étudié et vu durant le stage. Il est à signaler, d'autre part que certains chapitres ont été détaillés complétés par des exercices ou repris et les annexes correspondantes nous ont été distribuées.

Un certain nombre de séances ont été consacrées à l'étude de différents projets inspirés d'exemples concrets :

- projet de drainage d'une plaine irriguée en Iraq
- critères pour l'amélioration par lessivage de sols salés au Pérou
- étude d'un projet de drainage sur Pérou.

Des excursions ont été organisées dans différentes régions du pays afin de nous montrer certains projets réalisés ou en cours aux Pays-Bas et de nous faire visiter des organismes et des sociétés ayant un rapport avec le drainage.

Quoique la durée du stage est trop courte pour couvrir tous les aspects du drainage, j'ai pu toutefois avoir beaucoup d'éléments me permettant de mieux comprendre les problèmes de drainage et donc, en particulier, d'avoir des idées nouvelles me permettant de concevoir et d'appliquer une meilleure approche pour l'étude des rapports sol-eau dans les périmètres irrigués.

D'autre part, en plus de l'intérêt qu'a présenté le cours, les contacts qui ont eu lieu avec les différents spécialistes Hollandais en matière de drainage (et notamment en rapport avec la salinisation), avec les différents participants (et notamment ceux spécialistes en sciences du sol), m'a permis et me permettra de plus en plus d'avoir des sources d'informations plus nombreuses et de profiter de leurs expériences acquises dans les différents pays où ils travaillent face aux problèmes qui peuvent être similaires à ceux existant en Tunisie.

FIN

33

VUE