





00008278

STATE OF CALIFORNIA  
DEPARTMENT OF REVENUE  
OFFICE OF THE ASSISTANT ATTORNEY GENERAL

~~00000000~~

*[Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page]*

PREMIER COURS NATIONAL POST-GRADUEL  
SUR L'IRRIGATION, LE DRAINAGE  
ET LA GESTION DES RESSOURCES HYDRIQUES

COORDINATION:

INSTITUT INTERAMERICAIN DE  
COOPERATION POUR L'AGRICULTURE (IICA)  
FACULTE D'AGRONOMIE ET  
MEDECINE VETERINAIRE (FAMV)

SOUTIEN FINANCIER:

AGENCE DE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL (USAID)  
AGENCE CANADIENNE POUR LE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL (ACDI)  
INSTITUT INTERAMERICAIN DE COOPERATION POUR L'AGRICULTURE (IICA)  
MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DES RESSOURCES NATURELLES ET  
DEVELOPPEMENT RURAL (MARNDR)  
FACULTE D'AGRONOMIE ET MEDECINE VETERINAIRE (FAMV)

TEXTE : RELATION: SOL-PLANTE-EAU  
DACTYLOGRAPHIE : LAURENCE JOACHIM - MOYSETTE VICTOR  
DESSINS : JEAN ROBERT MOREL  
IMPRESSION : JEAN NICOLAS JOSEPH

RELATIONS SOL - PLANTE - EAU

## TABLE DE MATIERES

	PAGE
TABLE DE MATIERES	
LISTE DE FIGURES	iv
LISTE DE TABLEAUX	vi
INTRODUCTION AU COURS	
CHAPITRE I	2
LE SOL	2
1.1.1 Le Concept de sol	2
1.1.2 Composition du sol	3
1.1.3 Le profil du sol	4
1.2 Les propriétés physico-chimiques du sol associées à ses caractéristiques basiques	5
1.2.1 Les caractéristiques physiques	5
1.2.2 Les propriétés physico-chimiques du sol	15
1.2.3 La matière organique et les caractéristiques du sol	21
1.2.4 La pente et les caractéristiques du sol	22
1.2.5 Les sels et les caractéristiques du sol	23
1.2.6 Classification des sols pour l'irrigation	36
CHAPITRE II	
L'EAU DANS LE SYSTEME "SOL-PLANTE-EAU"	39
2.1 Le sol et la retention d'eau	41
2.1.1 Les différents niveaux d'humidité du sol	41
2.1.2 Expression de l'humidité du sol	42
2.1.3 Mesure de l'humidité du sol	43
2.1.4 Classification de l'eau du sol en fonction des ni- veaux d'humidité	50
2.2 Mouvement de l'eau dans le sol	54
2.2.1 La vitesse d'infiltration	56
2.2.2 La vitesse de percolation	59
2.2.3 La conductivité hydraulique (K)	60

## CHAPITRE III

	LA PLANTE DANS LE SYSTEME "SOL-PLANTE-EAU"	62
3.1.1	Généralités	62
3.1.2	Objectifs du chapitre	62
3.1.3	Eléments de base à retenir	62
3.2	La plante dans le système "Sol-plante-eau"	63
3.2.1	Caractéristiques des racines des plantes et l'exploration du sol	64
3.2.2	Taux de consommation d'eau pour la plante	70
3.2.3	Remarques et conclusions sur les formules	81
3.2.4	Relation entre la production et l'évapotranspiration	82

## CHAPITRE IV

	LES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION AU NIVEAU DES PROJETS ET AU NIVEAU DU CHAMPS	88
4.1	Généralités	89
4.2	Quelles quantités d'eau faut-il apporter aux plantes?	90
4.2.2	Méthode de calcul des besoins en eau	91
4.2.3	Détermination des variables du bilan hydrique	92
4.2.4	Calcul des besoins nets en eau d'irrigation BN	95
4.2.5	Besoins Bruts en eau d'Irrigation BB	96
4.2.6	Besoins en eau de lessivage	96
4.3	Quand faut-il irriguer?	98
4.3.1	Le concept de la programmation de l'irrigation	98
4.3.2	Hauteur d'irrigation	98
4.3.3	Fréquence et intervalle d'irrigation	100

## CHAPITRE V

	ALIMENTATION EN EAU D'IRRIGATION	102
5.1	Généralités	104
5.2	Estimation préliminaire des débits d'irrigation au niveau des projets	105
5.2.1	Calendrier cultural et superficie du projet	106

	PAGE	
5.2.2	Besoins en eau	
5.2.3	Débits fictifs continus et volumes	106
5.2.4	Efficacité du projet	108
5.2.5	Commentaires sur les disponibilités et les besoins en eau	109
5.3	Estimation des modules d'irrigation au niveau de la parcelle	109
5.3.1	Calcul de h	110
5.3.2	Calcul du temps pratique d'arrosage, $t_p$	110
5.3.3	Espacement entre deux irrigations (I)	111
5.3.4	Calcul de Q	111
5.3.5	Surface optimale d'arrosage pour usager (s)	112
5.3.6	Repartition du débit Q	112
A	ANNEXE	114
1.	LE SOL	
1.1	Détermination de la texture du sol par la méthode du toucher	114
2.1	Détermination de la vitesse d'infiltration au moyen des infiltromètres à double anneau	117
2.2	Détermination de la Conductivité hydraulique en absence d'une nappe par la méthode Porchet au méthode du trou de tarrière inversé	129
3.1	Calcul de l'évapotranspiration réelle par la méthode de Blaney-Criddle adapté par la FAO	137
3.1	Généralités	137
3.2	Calcul de Eto suivant la méthode de Blaney-Criddle	
3.3	Choix du coefficient cultural Kc	143
3.4	Conclusions et Recommandations sur l'emploi de la méthode de Blaney-Criddle	
4.	ESTIMATION DES BESOINS EN EAU	154
4.1	Méthode de solution	
	BIBLIOGRAPHIE	155



## LISTE DE FIGURES

FIGURE		PAGE
I - 1	Repartition des différentes phases dans un sol normalement ressuyé	3
I - 2	Profil type du sol	4
I - 3a	Triangle de texture (D'après le Soil Survey Manual 1951)	7
I - 3b	Le triangle des textures (Classification française)	8
I - 3c	Le triangle des textures (D'après Agriculture Canada)	8
I - 4a	Résumé des conditions de structures du sol	10
I - 4b	Les agents de dégradation de la structure, et les moyens de combattre leurs effets	11
I - 5	Relation entre la profondeur de la nappe phréatique du sol et la salinité	23
I - 6	Classification des eaux d'Irrigation	28
II -1	Relation Potentielle - humidité (effet d'hystérisis)	47
II- 2	Etats de l'eau dans le sol, son utilisation par les plantes	52
II- 3	Relation entre l'eau utile totale du sol en pourcentage volumique et sa texture	53
II- 4	Les trois aspects de la perméabilité du sol	55
III-1	Relation entre la croissance des plantes et les conditions d'humidité d'un sol franc	69
III-2	Patron d'extraction de l'eau, dans les sols homogènes, par les racines des plantes	69
A-II-1	Schéma d'un profil en escalier pour un test de conductivité hydraulique par horizons	130
A-III-1	Prédiction de ETo à partir du facteur f de Blaney-Criddle pour différentes conditions d'humidité relative minimum, d'heures d'insolation par jours et du vent diurne	140
A-III-2	Exemple de courbe du coefficient (pour le maïs)	147

A-III-3 Valeur moyenne de  $K_c$  pendant la phase initiale, en tant que fonction du niveau moyen de  $ETo$  (Pendant la phase initiale) et de la fréquence des irrigations ou des pluies significatives.

## LISTE DE TABLEAUX

TABLEAU		PAGE
I - 1	Dimensions des particules du sol (U.S.D.A.)	6
I - 2	Résumé sur la réaction du sol et le pH	18
I - 3	Réactions optimales du sol pour différentes cultures économiques	20
I - 4	Classification des sols salins et alcalins	27
I - 5	Relation entre la salinité dans la zone racinaire et la croissance des plantes	27
I - 6	Tolérance relative des cultures aux sels	32
I - 7	Equations pour calculer le rendement relatif pour différentes cultures développées dans des conditions de salinité	34
I - 8	Classification des sols pour l'irrigation (D'après Villanueva, 1977)	38
II- 1	Quelques valeurs caractéristiques du pF	46
II- 2	Indications pour juger la quantité d'eau dont disposent les plantes (toucher ou aspect du sol)	49
II- 3	Classification des vitesses d'infiltration	58
II- 4	Classes d'infiltration en fonction du temps d'application d'une hauteur d'eau de 10 cm	59
II- 5	Les classes de conductivité hydraulique, reportées par Ortiz Villanueva Chapingo, Mexico 1977	61
III- 1	Profondeur moyens d'enracinement des plantes couramment cultivées	
III- 2	Périodes critiques pour différentes cultures du point de vue de la demande d'eau	68 86
A-II-1	Régistre de données pour le test d'infiltration	120
A-II-2	Classification des vitesses d'infiltration	122
A-II-3	Classe d'Infiltration en fonction du temps d'application d'une hauteur d'eau de 10 cm.	123
A-II-4	Registre d'un test d'infiltration effectuée à St Raphael	125

TABLEAU	PAGE
A-II - 5 Exemple de détermination des indices de l'infiltration par la méthode de la pente moyenne	127
A-II - 6 Régistre de Données pour le test de conductivité	131
A_II - 7 Classification de la Conductivité hydraulique "K"	134
A-II- 8 Régistre des données pour un test de perméabilité sur la ferme Papaye à Hinche	135
A-II - 9 Exemple de calcul de la Conductivité hydraulique "K"	136
A-III- 1 Pourcentage Journalier Moyen (p) des heures annuelles de Lumière Diurne sous différentes latitudes	139
A-III- 2 Coefficient cultural Kc de cultures de plein champ et de cultures maraîchères pour les différentes phases de la croissance végétale et conditions climatiques dominantes	145
A-III-3 Durée de la saison végétative et des phases de développement d'un certain nombre de cultures de plein champ; quelques indications	151
A-IV - 1 Données climatiques de la plaine de Léogane	159
A-IV - 2 Quelques valeurs de "K" saisonnier pour l'ancienne formule de Blaney-Criddle	160
A-IV - 3 Evapotranspiration réelle des cultures ETR <sub>ij</sub> pour le calendrier agricole en vigueur dans la plaine de Léogane (Méthode Blaney-Criddle)	162
A-IV - 4 Fractions C <sub>ij</sub> des terres emblavées pour la culture i pour le mois j par rapport à la superficie totale pour le plan de cultures en vigueur dans la plaine de Léogane	163
A-IV - 5 Evapotranspiration réelle pondérées ETR <sub>ij</sub> pour le calendrier agricole, en mm	
A-IV - 6 Précipitation effective (pF) esperés à différents niveaux, de probabilité dans la plaine de Léogane (mm)	165
A-IV-7 Précipitation efficace PE à 65% esperés à différents niveaux de probabilité dans la plaine de Léogane (mm)	166

PAGE

A-IV - 8 Besoins Nets (BNf) en eau d'irrigation dans la  
plaine de Léogane en mm et en l.p.s/A à 80% de  
probabilité

167

## INTRODUCTION AU COURS

## Résumé:

En planifiant l'opération d'un système d'irrigation, le Spécialiste (Ing. ou Agr.) doit s'intéresser aux relations "sol-plante-eau-climat" de façon à satisfaire les besoins en eau des plantes en quantité suffisantes, au moment optimum et par une méthode adéquate.

Ainsi, il doit connaître les caractéristiques des sols comme réservoir d'eau pour la plante, les aptitudes des plantes à pouvoir utiliser l'eau de façon efficiente sur un sol et dans des conditions climatiques données. Par conséquent, les objectifs généraux de cette intervention peuvent se résumer comme suit:

- 1o) Rendre le participant à même de définir et identifier les facteurs de base qui conditionnent l'utilisation de l'eau au niveau de la parcelle irriguée,
- 2o) Apprendre au participant à caractériser le sol à partir des indices et des paramètres,
- 3o) Apprendre au participant à estimer la consommation en eau des plantes à partir des caractéristiques du sol et du climat,
- 4o) Apprendre au participant à programmer l'irrigation en tenant compte des besoins en eau des plantes et des caractéristiques du sol.

## CHAPITRE I

## LE SOL

## 1.1.1 Le concept de sol

Le sol est l'un des facteurs qui déterminent l'usage de la terre ou de la végétation naturelle. D'autres facteurs sont: le climat, la topographie, l'hydrologie, etc...

A partir des observations en champ, on peut faire les remarques suivantes:

- 1o) La partie supérieure de la terre est constituée par une couche filtrante de matériaux non consolidés qui peut être d'épaisseur variable; c'est le sol.
- 2o) Sur une coupe verticale de la couche filtrante, il existe des différences entre les matériaux superficiels et sous-jacents. Ceci est dû au fait que la partie supérieure en contact avec l'atmosphère, est sujette à l'action transformatrice de l'eau, du vent et des changements de températures; d'autre part, cette partie est riche en matière organique qui favorise le développement des racines des plantes.

De ce qui précède, la définition du sol acceptable est la suivante:

"Le sol est un matériau minéral non consolidé, localisé à la partie supérieure de la croûte terrestre. Il résulte de l'action des facteurs génétiques et du milieu ambiant. Il sert de milieu naturel pour le développement des plantes terrestres

### 1.1.2 Composition du sol

Le sol est un système à trois phases: solide, liquide et gazeuse. Le volume occupé par chacun des composants dans un sol superficiel dans des conditions optimales pour le développement des plantes est présenté sur la figure I.1. Les propriétés physiques du sol résultent des rapports entre les éléments solides et les deux fluides: air et eau. La phase solide est celle dont le volume est le plus constant, tandis que les volumes occupés par les phases liquides et gazeuses sont très variables. La phase solide constitue la charpente du sol.

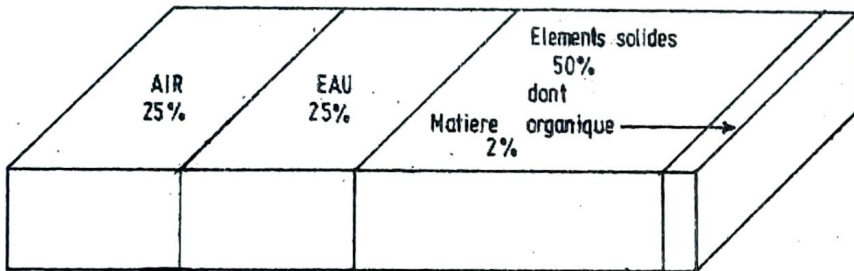


Fig. I-1 Répartition des différentes phases dans un sol normalement ressuyé.



### 1.1.3 Le Profil du sol

L'unité d'étude du sol est le profil. Un profil est une succession de couches appelées horizons qui sont plus ou moins bien définies et possèdent des caractéristiques propres. Un profil-type est représenté sur la fig. I.2. Les principaux horizons du sol sont désignés par les lettres A, B et C. L'horizon A est caractérisé par une grande activité biologique et une forte accumulation de matière organique (M.O). L'horizon B est généralement une zone d'accumulation de matériaux colloïdaux. Les horizons A et B représentent "Le solum ou vrai sol". L'horizon C est fait matériau non altéré (roche mère) qui supporte le solum. L'Ingénieur-Agronome est particulièrement intéressé au solum qui coïncide avec la zone racinaire des cultures normales. Ceux qui utilisent le sol sont intéressés à connaître ses propriétés. L'ingénieur d'irrigation et de drainage étudie minutieusement la vitesse avec laquelle l'eau pénètre dans la couche superficielle du sol, sa capacité de rétention d'eau, sa profondeur, ses propriétés de transmission d'eau, sa fertilité etc...

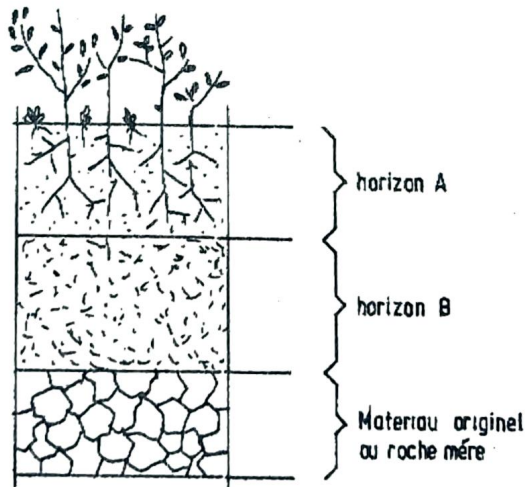


Fig. I-2 Profil type du sol.

- 1.2. Les propriétés physico-chimiques du sol associées à ses caractéristiques basiques.

Pour bien connaître les potentialités d'un sol, il faut étudier ses caractéristiques physiques et chimiques.

- 1.2.1. Les caractéristiques physiques

- 1.2.1.1. La texture du sol

La texture du sol caractérise la nature, la taille et la distribution des particules solides qui le constituent.

Quantitativement, elle s'exprime à travers de l'analyse granulométrique qui décrit les proportions relatives des diverses tailles des particules solides. Les résultats de cette analyse permettent de classer un sol en utilisant; soit le triangle textural équilatéral (fig. I.3a) de l'U.S. Conservation Soil Service, soient les triangles texturaux rectangulaires français (fig. I.3b) et canadiens (fig. I.3c)

Généralement, on appelle pierres, les matériaux minéralisés d'un diamètre supérieur à 7.5 cm; les graviers ont des diamètres variant entre 7.5 cm et mm, les sols sont constitués par un mélange de matériaux dont le diamètre est inférieur à 2mm lesquels sont classés en trois groupes de particules: le sable, le limon et l'argile (voir tableau I.1)

TABLEAU I.1 Dimensions des particules du sol (U.S.D.A.)

Sol	Diamètre (mm)	Limites (mm)
I SABLE	2.00-0.05	
1.1 Très grossier		2.00-1.00
1.2 Grossier		1.00-0.50
1.3 Moyen		0.50-0,25
1.4 Fin		0,25-0,10
1.5 Très fin		0,10-0,05
II LIMON	0,05-0,002	
2.1 Grossier		0,05-0,02
2.2 Fin		0,02-0,002
III ARGILE	< 0,002	

Fig. I-3 Les triangles de Classification des Textures

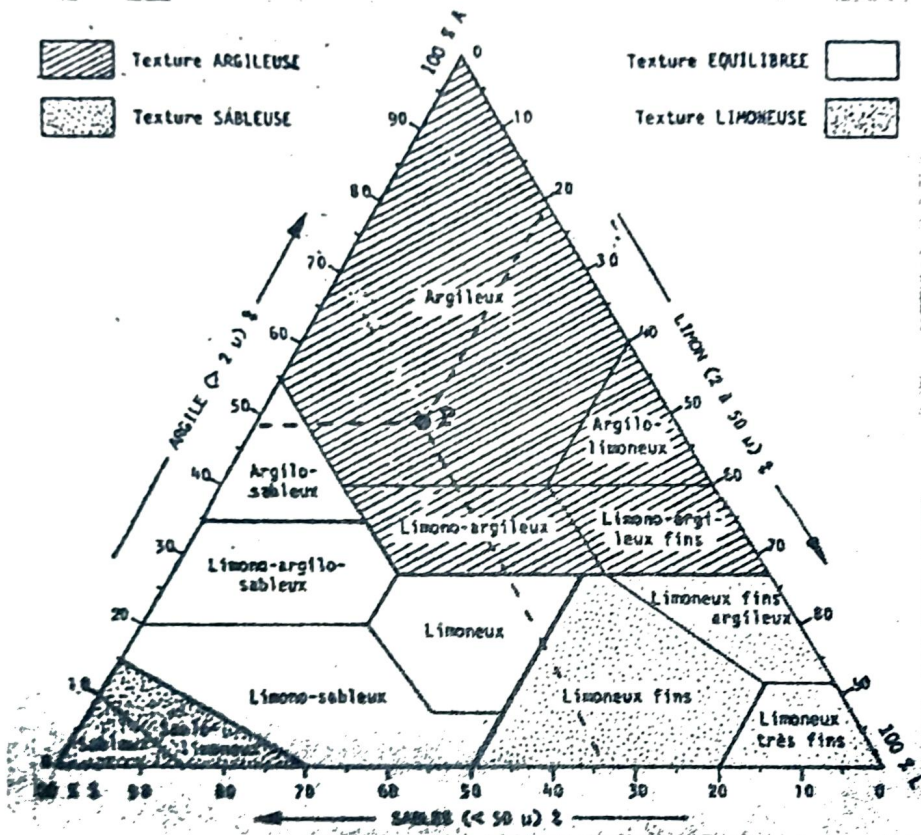


Fig. I-3.a. Triangle des textures (D'après le Soil Survey Manual 1951)

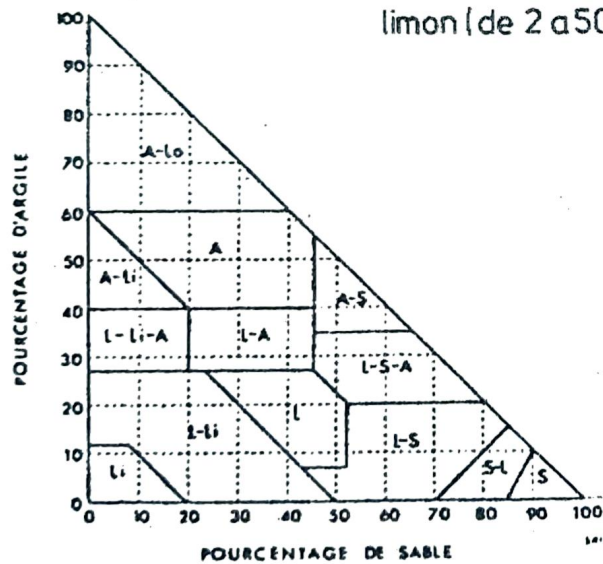
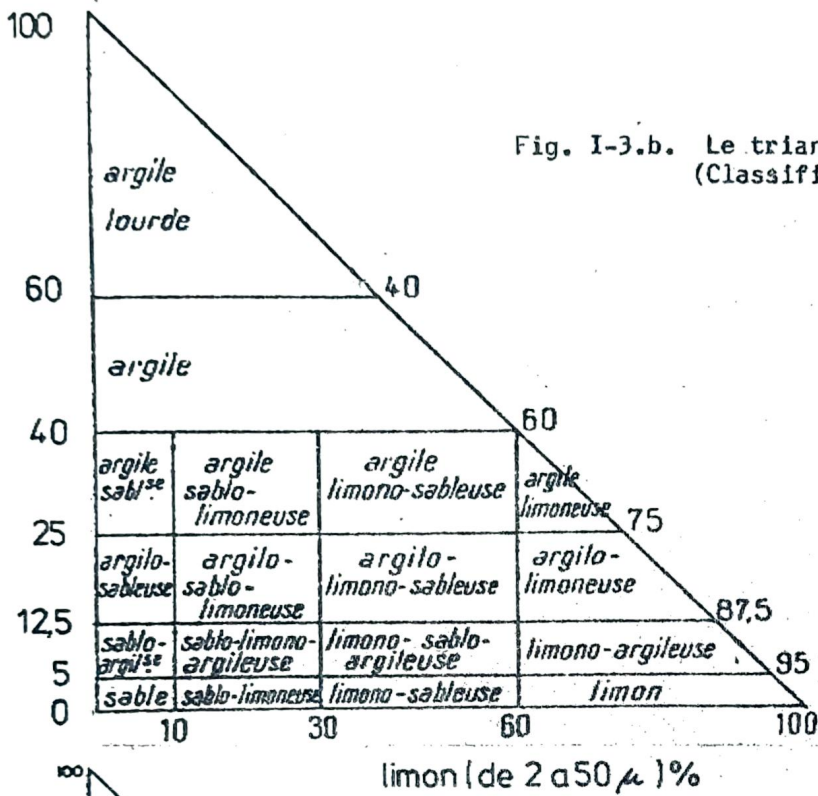


Fig. I-3.c. Le triangle des textures (D'après Agriculture Canada)

### 1.2.1.2 La Structure du sol

Dans le sol, les particules élémentaires solides (sable, limon et argile) peuvent être libre ou s'adhérer les uns aux autres, pour former des agrégats. La structure d'un sol se caractérise par la disposition des particules et des agrégats. Les pratiques culturales modifient la structure du sol, tel n'est pas le cas de la texture. Les pratiques saines la conservent et l'améliorent et celles inadéquates la détruisent. Basiquement, on a trois types de structures:

- a) Les structures simples ou particulières,
- b) Les structures prismatiques,
- c) Les structures en plaques.

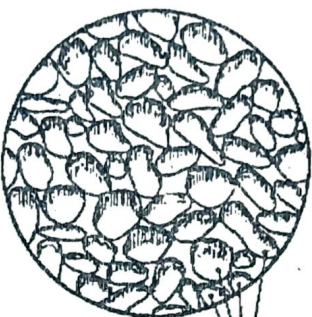
C'est de la structure du sol que découlent directement des propriétés telles que: la porosité, la consistance, la rétention d'eau et le mouvement de l'eau dans le sol.

Sur la figure I.4, on présente les structures favorables et défavorables (fig I.4a), les agents de dégradations de la structure et les moyens de combattre leurs effets (fig. I.4b).

### 1.2.1.3 La porosité du sol

C'est la fraction de l'unité de volume du sol en place qui n'est pas occupée par les éléments solides. Elle est remplie par l'air et/ou par l'eau. Pour calculer la porosité d'un sol, on doit connaître ses densités réelle et apparente. On doit, cependant, faire une distinction entre la macroporosité d'une part, qui comprend les pores les plus gros (> 8 microns en moyenne) dans lesquels l'air et l'eau circulent librement sans être rete-

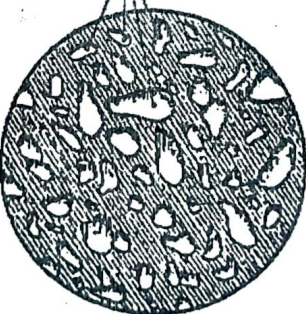
LES STRUCTURES PARTICULAIRES  
 DEUX TYPES DE STRUCTURE SONT DEFAVORABLES :



Ne retiennent pas l'eau si les sables sont grossiers : Le sol est FILTRANT  
 Se tassent et forment une croûte si les sables sont très fins : le sol est BATTANT

Éléments sableux de taille variable en tassés sans aucune liaison

Éléments sableux noyés dans une masse d'argile dispersée  
 LEURS INCONVENIENTS :

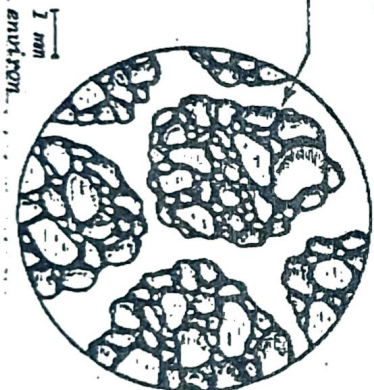


LA STRUCTURE GRUELEUSE SEULE EST A RECHERCHER

Sont imperméables à l'air et à l'eau : le sol est ASPHYXIANT.  
 Offrent une grande résistance à la pénétration des racines.  
 Sont difficiles à travailler.

SES AVANTAGES :

Une petite motte, ou grumeau : un ensemble de grains de sables et de limons liés en agrégats par le complexe argilo-humique flocculé.  
 Ces petites mottes sont obtenues par le travail du sol, les alternances de dessiccation et d'humectation, et l'activité biologique.  
 Si ces mottes résistent, sans se prendre en masse, à l'effet de la pluie, on dit que la structure est STABLE.



Elle laisse s'écouler l'excès d'eau mais en retient assez dans ses nombreux capillaires.  
 Elle assure une bonne aération aux racines et aux microbes aérobies  
 Elle facilite la préparation des lits de semence  
 Elle favorise la germination des graines, puis la pénétration des racines et leur exploitation du sol

Fig. I-4.a. Résumé des conditions de structures du sol

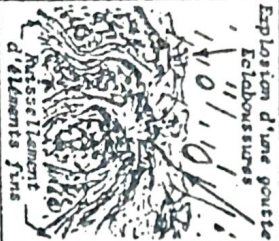
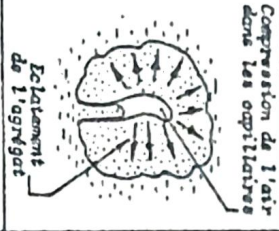
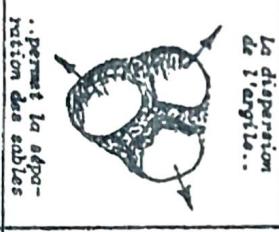
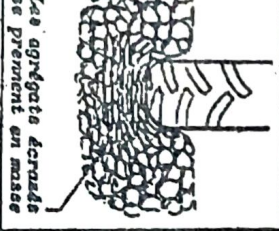

LES AGENTS DE DEGRADATION		PREVENTIONS ET REMEDES
<p>LE CHOC DES GOUTTES D'EAU SUR LE SOL NU</p>  <p>Eruption d'une goutte Eclaboussures Mise à nu d'éléments fins</p>	<p>L'ECLAITEMENT DES AGREGATS PAR L'EAU D'IRRIGATION</p>  <p>Compression de l'air dans les opillaires Eclatement de l'agregat</p>	<p>Couvrir le sol : engrais vert, paillage, film plastique... Faciliter l'infiltration et l'évacuation rapides de l'eau (les labours dressés) et les amendements calcaires et humifères.</p>
<p>LA DISPERSION DES COLLOIDES</p>  <p>La dispersion de l'argile... ...permet la appropiation des sables</p>	<p>LE TASSEMENT EN PERIODE HUMIDE</p>  <p>Les agrégats détrempés se percent en masse</p>	<p>Floculer l'argile et stabiliser cette floculation par l'humus. Eviter les charrois et le pâturage en période humide</p>
<p>L'EFFET DE CHOC DES INSTRUMENTS A ROTATION RAPIDE</p>  <p>Dont de fortes Eclatement des mottes en agrégats</p>	<p>Réduire la vitesse de rotation, surtout pour une préparation d'automne.</p>	

Fig. I.4.b. Les agents de dégradations de la structure, et les moyens de combattre leurs effets



nus et la microporosité, d'autre part qui se réfère aux pores plus petits que 8 microns qui retiennent l'eau.

a) Densité réelle ( $\rho_s$ )

C'est la masse par unité de volume des éléments constituant la phase solide du sol. Constante pour un sol donné, elle varie avec les proportions des différentes particules. Elle est généralement comprise entre 2.4 et 2.8 g/cm<sup>3</sup>. Ce n'est qu'exceptionnellement qu'elle peut s'en écarter: dans le cas des sols très humifères par exemple, elle peut descendre à des valeurs voisines de 2.

A titre indicatif, on peut donner les valeurs moyennes de " $\rho_s$ " pour les sols suivants:

1. Sol moyen	2.6	gramme/cm <sup>3</sup>
2. Sol calcaire	2.4	" "
3. Sol humifère	2.0	" "
4. Sol sableux	2.8	" "

b) Densité apparente ( $\rho_a$ )

C'est la masse par unité de volume d'un sol séché dans les conditions naturelles. Autrement dit, c'est le rapport du poids de sol sec d'un échantillon, au poids de l'eau qui occuperait le même volume que cet échantillon occupait dans le sol non perturbé.

$$\rho_a = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_s}{V_t}$$

où:

$P_s$  = Poids du sol séché à 105°c

$P_e$  = Poids de l'eau

$V_t$  = Volume total de l'échantillon

En pratique, nous avons les valeurs suivantes pour " $\rho_a$ ":

1. Sols sableux	1.5 à 1.8	gramme/cm <sup>3</sup>
2. Sols limoneux	1.3 à 1.5	" "
3. Sols argileux	1.1 à 1.3	" "

Comparée à la densité réelle  $\rho_s$ , la densité apparente permet de déduire la porosité, suivant la relation:

$$n = \left( 100 - \frac{D_a}{D_r} \right) \times 100 = \left( 100 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right) \times 100$$

où:

$n$  = Porosité en pourcentage

#### 1.2.1.4 Consistance du sol

C'est la résistance d'un matériau à la déformation ou à la rupture, c'est à dire, l'adhésion de la masse du sol. La consistance du sol peut être décrite en fonction de la friabilité, de la plasticité et de l'adhérence.

- La friabilité indique la facilité avec laquelle les sols humides s'effritent. Elle est décrite comme suit: coulant mou, légèrement dur, dur, très dur, extrêmement dur.
- La plasticité se réfère à la capacité d'un sol mouillé de changer de forme quand il est soumis à des forces externes et de pouvoir conserver la nouvelle forme. En général, les sols rigides contiennent moins de 15 à 20% d'argile.
- L'adhérence est le degré avec lequel un sol mouillé se colle aux autres objets. Les sols sont classés comme: adhérent, légèrement adhérent, adhérent et très adhérent.

La consistance et la structure sont fortement liées. La structure est le résultat des forces existantes en phase solide, la consistance est une mesure indirecte de ces forces.

#### 1.2.1.5

##### Couleur du sol

C'est la caractéristique du sol la plus évidente et qu'on peut déterminer facilement. Si on associe la couleur à d'autres caractéristiques observables comme, la structure, la texture et la consistance on peut déduire la majorité des propriétés physico-chimiques des sols.

La couleur du sol dépend de la nature du matériau originel à partir duquel il s'est formé, du drainage externe et interne et des températures prédominantes.

Les sols bien aérés sont bruns, presque noirs quand ils ont un bon pourcentage d'humus. Ils peuvent être jaunes ou rouges quand ils contiennent des composés ferreux hydratés.

Les sols non aérés présentent une coloration gris-verte due à la réduction du fer ferreux ou ferrique.

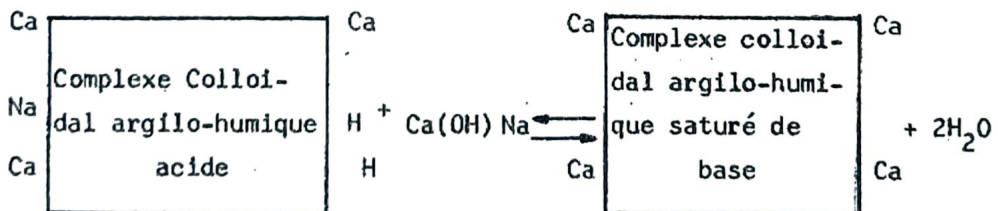
## 1.2.2 Les propriétés physico-chimiques du sol

### 1.2.2.1 Le complexe colloïdal argilo-humique

Les sols présentent une fraction colloïdale constituée par l'argile et l'humus. Cette fraction confère au sol des propriétés comme, la contraction, la floculation et la dispersion, la plasticité et la cohésion. Ces propriétés sont dues à l'effet combiné de deux facteurs:

- La grande surface spécifique des colloïdes qui varie entre 15 et 800 m<sup>2</sup>/gramme.
- La charge électrique négative du complexe colloïdal argilo-humique.

Dans les sols, les cations (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, etc...) chargés positivement sont absorbés par les colloïdes chargés négativement. Il en résulte que les cations de la solution du sol peuvent remplacer ceux qui sont absorbés par le complexe argilo-humique. Il se produit une réaction d'échange de cations qui s'exprime comme suit:



Les caractéristiques du sol varient avec le type et la proportion de cations échangeables présents. Par exemple, les sols acides contiennent beaucoup d'ions  $H^+$  échangeables et solubles. Les sols calcaires sont saturés en bases à 100% et contiennent une forte proportion de  $Ca^{++}$  échangeable. Les sols alcalins contiennent plus de 15% de  $Na^+$  échangeables.

Les cations échangeables sont en équilibre avec ceux qui sont dans la solution du sol. Si les cations de la solution du sol sont absorbés par la plante, la réaction précédente se produit de la droite vers la gauche. Ainsi les cations échangeables représentent une réserve nutritive.

Les ions dissous dans la solution du sol peuvent être facilement percolés par lessivage. Par contre, les cations échangeables sont difficilement lessivés à moins que la solution du sol contienne un sel qui alimente le système en cations qui sont échangés dans la recherche d'un équilibre.

#### 1.2.2.2 La capacité d'échange des cations (CEC)

Le processus par lequel les cations de la solution du sol remplacent ceux absorbés s'appelle échange des cations. Les sols diffèrent quant à leur capacité d'échange des cations par unité de poids. Les milliéquivalents de cations absorbés par 100g est ce qu'on appelle la CEC. Elle est directement proportionnelle à la quantité d'argile et d'humus. Par exemple, l'humus a une CEC de 200, l'argile vermiculite 150, le quartz 0,01.

La force chimique avec laquelle les cations sont absorbés diminue dans l'ordre suivant:  $H > Ca > Mg > K > Na$ ; par conséquent, dans un sol soumis au lessivage, les cations ont tendance à s'accumuler selon la séquence précédente. Le  $Ca^{++}$  constitue dans la majorité

des sols 80% des bases échangeables.

Si 100 grammes de sol ont une CEC de 20 meq et 12 meq de bases échangeables, le pourcentage de saturation en bases est de 60%.

En général, les sols des régions tropicales humides présentent une prédominance de cations  $H^+$ , tandis que ceux des régions arides ont une saturation en bases qui peut aller au-delà de 90%

### 1.2.2.3 La réaction du sol

1.2.2.3.1 La réaction du sol est le degré d'alcalinité ou d'acidité du sol exprimé en termes de pH. Cet indice exprime la quantité relative de  $H^+$  et  $OH^-$  dans la solution du sol et reflète le pourcentage de saturation en base. Quand la solution contient le même nombre d'ions  $H^+$  et  $OH^-$  (eau distillée) on a une réaction neutre. En ajoutant du  $Ca(OH)_2$  au sol neutre, on augmente les ions  $OH^-$  par rapport aux  $H^+$  et le sol devient alcalin. De façon inverse, si on apporte au sol un produit acide les  $H^+$  l'emportent sur les  $OH^-$  et la réaction est acide. Selon Sorensen, la méthode la plus convenable pour exprimer la relation entre  $H^+$  et  $OH^-$  est le pH qui est le logarithme naturel de l'inverse de la concentration en ions  $H^+$  en g/litre dans un système.

$$pH = \log \frac{1}{(H^+)}$$

La neutralité s'observe pour la concentration en ions  $H^+$  de:  $1 \times 10^{-7}$  g de  $H^+$ /l de solution. Ceci correspond à un pH de 7.0. Ainsi l'acidité varie en raison inverse du pH. Les différents degrés d'acidité du sol se présentent au tableau 1.2.

Nous devons signaler que le pH des sols des régions humides plus ou moins lessivés est inférieur à celui des zones arides. Quand le pourcentage de saturation en bases est élevé le pH augmente.

TABLEAU I.2 Résumé sur la réaction du sol et le pH.

		← Acidité		neutralité		Alcalinité →				
		Très Forte	Forte	Modérée	Légère	Légère	Modérée	Forte	Très forte	
pH		3	4	5	6	7	8	9	10	11
		pH extrême des sols tourbeux			pH des sols minéraux des régions humides		pH des sols minéraux des régions arides		pH des sols alcalins minéraux avec PSE > 15%	
		pH pour la majorité des sols minéraux								

PSE = Pourcentage de sodium échangeable.

### 1.2.2.3.2 Le pH du sol et le développement des plantes

Certaines plantes se développent sur des sols acides, d'autres non. Dans beaucoup de cas, on fait le chaulage. Quand le pH diminue, la proportion des éléments solubles qui sont toxiques (Fe, Al, Mn) augmentent tandis que celle des éléments nutritifs essentiels tels que P diminue. D'autre part, quand le  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se trouve dans le sol, il s'hydrolyse facilement pour former le NaOH. Cette base forte attaque la matière organique du sol et forme une solution obscure qui donne un résidu de couleur noire ou café à la surface du sol. Non seulement, l'alcali noir est corrosif pour les tissus, mais il est associé à une grande quantité de  $\text{Na}^+$  absorbée qui favorise la défloculation du sol. Dans ces conditions le sol a un  $\text{pH} \geq 8,5$  et un pourcentage de sodium échangeable (PSE) supérieur ou égal à 15%.

L'acidité ou l'alcalinité des sols renseigne sur la classe des plantes qui peuvent se développer. Le tableau I.3 présente les réactions optimales des sols pour les différentes cultures économiques.



TABLEAU I.3 Réactions optimales du sol pour différentes cultures économiques.

CULTURES		pH	CULTURES		pH
Nom Vulgaire	Nom Scientifique		Nom Vulgaire	Nom Scientifique	
1. Alfalfa	Medicago sativa	6.5-8.0	19-Sorgho	Sorghum vulgare	5.0-6.5
2. Coton	Gossypium sp	6.0-8.0	20 Tabac	Nicotiana tabacum	5.5-7.5
3. Ananas	Ananas sativus	5.0-6.0	21 Thé	Thea sinensis	4.5-5.5
4. Arachides	Arachis hypogea	5.5-7.0	22 Tomate	Solanum lycopersium	5.5-7.0
5. Riz	Oryza sativa	5.0-6.5	23 Blé	Triticum vulgare	6.0-8.0
6. Avoine	Avena sativa	5.0-7.0	24 Vigne	Vitis sp	6.0-7.5
7. Banane	Musa sp	6.0-7.5			
8. Cacao	Theobroma cacao	5.0-7.0			
9. Caffé	Coffea sp	4.5-7.0			
10. Canne à sucre	Saccharum officinarum	6.0-8.0			
11. Cirouelle	Prunus sp	6.5-8.0			
12. Cocotier	Cocos sp	6.0-7.5			
13. Tournesol	Helianthus annuus	5.5-7.5			
14. Mais	Zea mays	6.0-7.0			
15. Pomme	Malus sp	6.0-8.0			
16. Olivier	Olea europea	6.0-8.0			
17. Pomme de terre	Solanum tuberosum	5.0-7.0			
18. Betterave à sucre	Beta vulgaris	6.5-7.5			

### 1.2.3 La matière organique et les caractéristiques du sol

#### 1.2.3.1 Origine de la matière organique du sol

Elle provient des racines des plantes, des résidus de récoltes et des cadavres et déchets d'animaux. La proportion de M.O varie dans les sols entre 2 et 4%. Ceux qui ont moins de 1% sont considérés comme déficients en M.O. Un sol est dit organique s'il contient plus de 20% de M.O bien décomposé et minéral s'il en a moins.

#### 1.2.3.2 Effets et importance de la M.O sur les sols.

L'influence de la M.O sur les propriétés physiques et chimiques des sols est considérable, même lorsqu'elle se trouve en petites quantités. La fonction bénéfique de la M.O peut se résumer comme suit:

- 1o) La M.O bien décomposée ou humus est un ciment qui facilite la formation et la stabilité des agrégats. Elle donne de la cohésion au sable et réduit la compacité de l'argile
- 2o) Par l'agrégation, elle augmente la microporosité du sable et sa capacité de rétention d'eau. De même, elle augmente la macroporosité de l'argile et son aération. On observe également une optimisation de l'infiltration d'eau et une réduction du danger de ruissellement et d'érosion.
- 3o) L'humus a des propriétés hydriques exceptionnelles, par exemple l'argile retient 15 à 20% d'eau dans une atmosphère saturée, l'humus en absorbe 80 à 90% de son poids.
- 4o) La décomposition de la M.O produit les différents éléments

nutritifs nécessaires au développement des plantes.

Nous devons souligner que l'eau d'irrigation tend à détruire la structure du sol en accélérant la dégradation de l'humus, il est fondamental que l'on ait une politique rationnelle de restitution de la matière organique en agriculture irriguée par l'apport de fumier, de compost et d'engrais verts.

#### 1.2.4 La pente et les caractéristiques du sol

La pente du sol en surface détermine son comportement vis à vis de l'eau et ses risques d'érosion. Elle influence le ruissellement, la percolation et la recharge de la nappe. Les sols qui ont une forte pente présentent un solum mince, peu de M.O., par conséquent, la capacité de rétention d'eau diminue ainsi que le potentiel agricole de la terre.

En général, on a trois classes de pente en agriculture irriguée

- 1o) Les pentes inférieures à 0,08%, inadéquates par défaut rendent les sols difficiles à drainer et à irriguer.
- 2o) Les pentes entre 0,2 et 0,6% (2 et 6 pour mille) optimales pour l'irrigation.
- 3o) Les pentes supérieures à 20% inadéquates par excès. Elles provoquent l'érosion du sol. L'irrigation est difficile voir impossible.

### 1.2.5 Les sels et les caractéristiques du sol

#### 1.2.5.1 Origine des sels du sol et occurrence

Tous les sols y compris ceux des zones humides contiennent des sels solubles. Cependant quand la teneur est élevée on a affaire à des sols salés. Beaucoup de sols sont salés parce qu'ils proviennent d'un matériau originel salé, d'autres le sont par inondation marine, par l'irrigation avec de l'eau salée. Toutefois, la majorité des sols affectés résultent d'une remontée capillaire de l'eau supérieure à la quantité qui descend à travers le profil. Ce phénomène se produit quand la nappe phréatique est élevée pendant des périodes prolongées, cas qui se présente dans les zones irriguées non dotées d'un système de drainage adéquat. En général, on trouve les sols salés dans les dépressions, les vallées et les régions arides ou semi-arides (fig. I.5.).

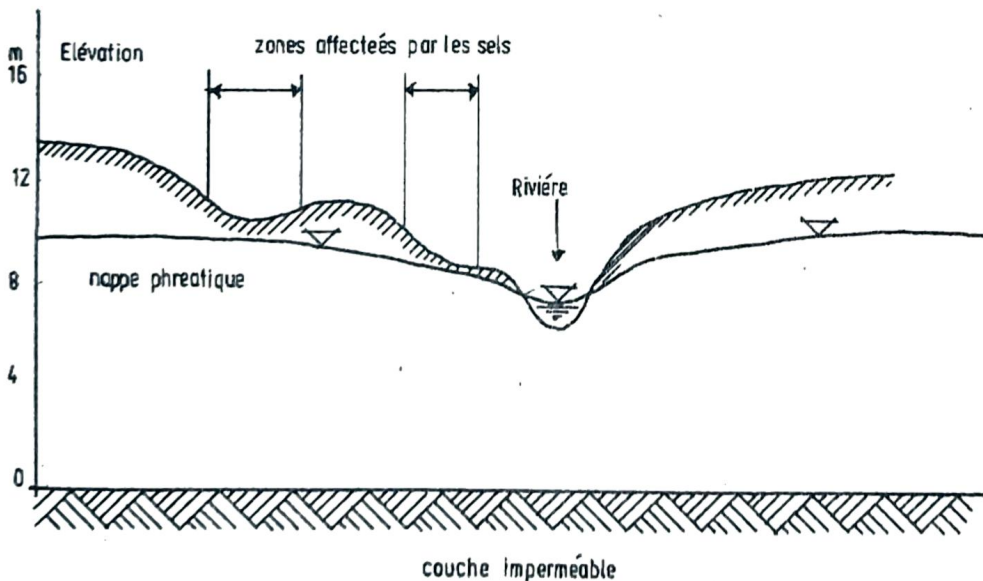


Fig. I.5 Relations entre la profondeur de la nappe phréatique du sol et la salinité.

### 1.2.5.2 Types de sels.

Dans les sols salés, les anions dominants sont les chlorures, les sulfates et les carbonates. Les sels les plus courants sont ceux de sodium et parfois de calcium et de Magnesium.

Dans le cas des sols normaux, la solution du sol contient principalement des sels de Ca. Par conséquent 80 % ou plus des cations échangeables sont constitués par le  $\text{Ca}^{++}$ . Les cations échangeables restants sont constitués par le  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$ . Il convient de souligner que le PSE est en général inférieur à 5% du total des cations (parfois on a  $\text{PSE} \leq 1\%$ )

La solution des sols salés est très concentrée et présente différents types de sels. Il en résulte que les cations absorbés sur le complexe colloïdal ne sont pas représentés essentiellement par le  $\text{Ca}^{++}$ . Les proportions des ions  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et surtout  $\text{Na}^+$  augmentent par rapport à celles rencontrées chez les sols normaux.

### 1.2.5.3 Expression de la salinité

La salinité peut être exprimée de différentes manières:

- Soit en millimhos par centimètre (mmhos/cm). Si l'on mesure la conductivité de l'eau d'irrigation, ou de l'eau extraite du sol (extrait de saturation).
- Soit en milligrammes par litres (mg/l) ou parties par million (p.p.m)
- Soit en milliéquivalents par litre meq/l.
- Soit par la pression osmotique de la solution (en bars)

Les relations entre ces différentes expressions sont les suivantes:

$$1 \text{ mmho/cm} = 10 \text{ meq/l}$$

$$1 \text{ mmho/cm} = 640 \text{ mg/l}$$

$$1 \text{ mmho/cm} = 0,36 \text{ bars de pression osmotique}$$

Rappelons que pour un ion donné, l'équivalent-gramme est égal à un ion-gramme divisé par la valence.

En matière d'irrigation, on exprime le plus souvent la salinité par la mesure de la conductivité de l'eau d'irrigation ou de l'extrait de saturation du sol. L'unité utilisée est le mmho/cm

#### 1.2.5.4. Classification des sols salins

La classification la plus pratique est celle utilisée par la United State Salinity Laboratory en 1954. Elle se base sur deux indices:

- a) La salinité du sol estimée au moyen de la conductivité électrique (C.E.) de l'extrait de saturation. L'unité employée est le mmho; le mho étant l'inverse de l'ohm.
- b) Le pourcentage de sodium échangeable (PSE) qui s'estime au moyen de la formule suivante:

$$\text{PSE} = \frac{\text{SE} \times 100}{\text{CEC}}$$

où:

SE = Quantité de sodium échangeable

CEC = Capacité d'échange de cations

On peut estimer PSE à partir des quantité de ( $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ),  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  trouvés dans l'extrait de saturation. La relation qui existe entre ces variables s'écrit comme suit:

$$\text{PSE} = \frac{100 (-0.0126 + 0,01475 \text{ RAS})}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \text{ RAS})}$$

où:

RAS = Relation d'absorption du sodium

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

$\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  correspondent aux concentrations des cations solubles exprimés en meq/l dans l'extrait de saturation.

En tenant compte des valeurs de CE et PSE, on distingue trois groupes de sols salés:

- 1o) Les sols salés non sodiques appelés sols salins
- 2o) Les sols salins-sodiques appelés sols alcalins et salins
- 3o) Les sols sodiques non salins appelés sols alcalins

Sur le tableau I.4, on présente un résumé des caractéristiques des sols affectés par les sels. Cette classification prend comme référence la résistance des plantes à la salinité du sol laquelle se présente au tableau I.5.

TABLEAU I.4 Classification des sols salins et alcalins

Nature du sol	Conductivité électrique de l'extrait de saturation (C.E.) à 25% C (mmhos/cm)	Pourcentage de sodium échangeable "PSE" %	PH (1)
1. Salin	$\geq 4$	$< 15$	$< 8.5$
2. Salin sodique	$\geq 4$	$\geq 15$	$\leq 8.5$
3. Sodique (alcalin)	$< 4$	$\geq 15$	$> 8.5$

N.B. Le pH est utile à des fins de diagnostic, cependant on trouve des cas exceptionnels où des sols avec un PSE  $> 15\%$  ont une réaction acide.

TABLEAU I.5 Relation entre la salinité dans la zone racinaire et la croissance des plantes

Réponse des cultures	CE mmhos/cm
1. Effets de salinité négligeables	0 - 2
2. Les rendements des cultures très sensibles peuvent baisser (majorité des arbres fruitiers)	2 - 4
3. Les rendements de la plupart des cultures diminuent	4 - 8
4. Seules les plantes tolérantes donnent des rendements économiques (coton, betterave à sucre, plantes fourragères)	8 - 16



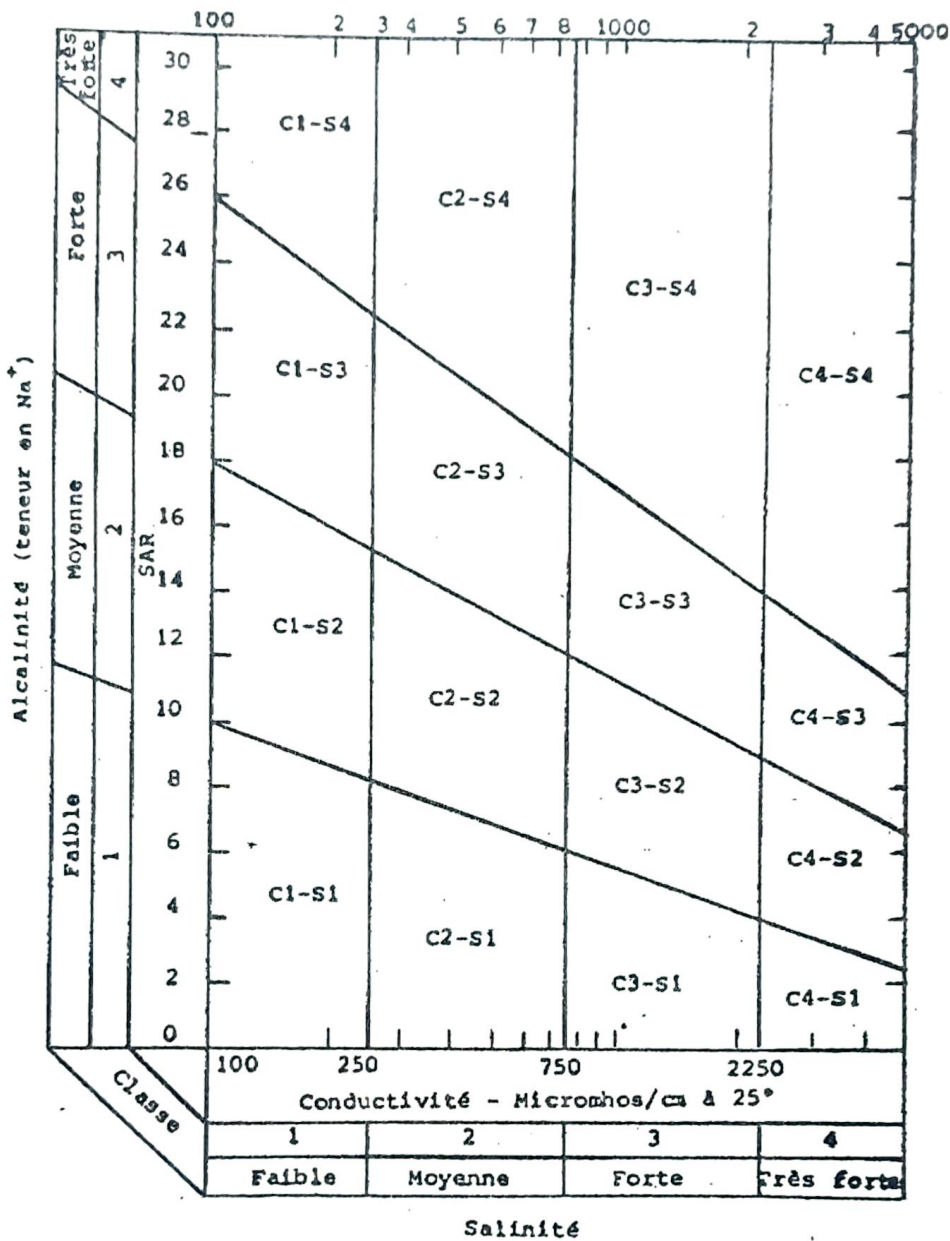


Diagramme de Riverside.

**CLASSIFICATION des EAUX d'IRRIGATION**

Fig. I-6 Classification des eaux d'irrigation

Les salinités limites de l'eau d'irrigation sont nettement moindres et dépendent en particulier de la fréquence des arrosages. On adopte généralement, pour la classification des eaux d'irrigation, le diagramme de Riverside de l'US Department of Agriculture, qui tient compte de deux critères principaux: La CE et le RAS (fig. I.6).

#### 1.2.5.4.1 Caractéristiques essentielles des sols salins

Ces sols se reconnaissent facilement par la présence de croûtes blanches de sels "solonchak" en surface. Les principaux anions qui s'y trouvent sont le  $\text{Cl}^-$  et le  $\text{SO}_4^{--}$  et en quantités inférieures le  $\text{HCO}_3^-$  et le  $\text{NO}_3^-$ . En général, le  $\text{Na}^+$  représente moins de 50% des cations solubles et par conséquent n'est pas absorbé de façon considérable.

Les sols salins sont presque toujours bien flocculés et très bien structurés, par conséquent leur perméabilité est égale ou supérieure à celle des sols normaux. Malheureusement, les excès de sels ont un effet adverse sur le développement de la majorité des plantes en réduisant la disponibilité de l'eau du sol.

La récupération de ces sols se fait par lessivage associé à l'établissement d'un système de drainage adéquat.

#### 1.2.5.4.2 Caractéristiques des sols sodiques ou alcalins.

Ces sols se reconnaissent par la présence de tâches noires en surface "alcali noir ou solonetz". Le cation principal dans la solution du sol est le  $\text{Na}^+$ , le  $\text{Ca}^{++}$  et le  $\text{Mg}^{++}$  se sont précipités en grande partie. Le pourcentage de sodium échangeable est supérieur à 15%.

Dans ces sols, la M.O. est dissoute par le NaOH et dispersée; parfois se déposant en surface par évaporation donnant lieu à une coloration noirâtre caractéristique. L'argile se disperse aussi car le cation  $\text{Na}^+$  n'arrive pas à neutraliser la charge négative du complexe colloïdal, il y a répulsion. Ainsi, la structure du sol se détruit, l'argile est transportée en profondeur et constitue une couche compacte imperméable. Les plantes ne peuvent pas se développer en raison de la faible aération de ces sols et de la toxicité du sodium.

Pour récupérer ces sols, on doit améliorer leur structure; cependant cette démarche n'est pas toujours facile. On doit appliquer de grandes quantités de gypse ou d'autres améliorants. L'intégration des correctifs peut être lente, due à la faible perméabilité du sol. On doit faire parfois des labours profonds associés au sous-solage.

#### 1.2.5.4.3 Caractéristiques des sols salins sodiques

Parce qu'ils contiennent un excès de sels solubles, leur apparence et leurs propriétés sont similaires à celles des sols salins, le complexe colloïdal est flocculé et le  $\text{pH} \leq 8.5$ . Cependant, si l'excès de sels solubles est lessivé les propriétés de ces sols peuvent changer considérablement. A mesure que la concentration des sels diminue dans la solution du sol, une partie du sodium absorbé s'hydrolyse pour former le NaOH qui est une base forte et fait augmenter le pH au-delà de 8,5 et accélère la précipitation des sels de Ca. Ceci fait élever le PSE.

La récupération de ces sols est compliquée car on doit prendre des précautions pour éviter la destruction de la structure du sol au cours du lessivage.

Le lessivage doit se faire avec de l'eau d'irrigation chargée de Ca pour éviter la dégradation de la structure. Il est recommandé de dissoudre le gypse dans l'eau d'irrigation pour l'appliquer. Cependant, nous devons signaler que l'on ne tire aucun avantage à apporter du Ca massivement, la quantité apportée doit pouvoir être dissoute par la hauteur d'eau d'irrigation.

#### 1.2.5.5 Effets des sels sur les rendements des cultures

Dans toutes les expériences menées à travers le monde sur la tolérance des cultures aux sels, on a constaté que le rendement des plantes diminue de façon linéaire à mesure que la salinité augmente (Acevas, 1979 *et al.*). On observe des déviations de la linéarité seulement à des niveaux où les rendements des cultures ne sont plus économiquement acceptables. L'équation proposée pour estimer les rendements relatifs pour une culture et une salinité données est la suivante:

$$RR = a + bCE_s$$

où:

RR = Rendement relatif exprimé en pourcentage du rendement maximum.

a et b Sont des paramètres qui dépendent de la culture

$CE_s$  = Est la conductivité électrique exprimée en mmho/cm

Cette équation s'applique pour chaque culture dans un intervalle salinité, limité par  $CE_{100}$  et  $CE_0$ .

- $CE_{100}$  représente la frontière inférieure de l'intervalle, les valeurs de  $CE_s$  inférieures à  $CE_{100}$  donnent un rendement maximum.
- $CE_0$  est la frontière supérieure de l'intervalle, les valeurs de  $CE_s$  supérieures à  $CE_0$  ne donnent pas des rendements économiques.

Dans les tableaux I.6 et I.7 on trouve respectivement la tolérance et les rendements relatifs des différentes cultures aux sels.

TABLEAU I.6 Tolérance relative des cultures aux sels

1. Cultures horticoles

Tolérance élevée CE 10-12 mmhos/cm	Tolérance moyenne CE 4-10 mmhos/cm	Faible Tolérance CE 3 - 4 mmhos/cm
Betterave de table épinard, colza, igname, melon	Tomate, chou, piment chou-fleur, laitue, mais, pomme de terre (white rose), carotte oignon, concombre, poivron, fraisier,	Echalottes, ail, rabano

2. Plantes fourragères

CE 12-18 mmhos/cm	CE 4 - 12 mmhos/cm	CE 2-4 mmhos/Ccm
Herbes de Bermude, trèfle, luzerne, Mais fourrage, cynodon-dactylon, sorgho	Alfalfa, avoine, herbe du soudan, trèfle blanc blé de fourrage	Trèfle hybride, trèfle rouge.

## 3. Cultures arbustives

CE 10-12 mmhos/cm	CE 4 -10 mmhos/cm	3 - 4 mmhos/cm
Palmier daltier	Grenadier, figulier olivier, vigne, agrumes	Pommier, cirouellier, oranger, amandier, abricotier, fraisier avocatier, limonier

## 4. Cultures courantes

CE 10-16 mmhos/cm	CE 6-10 mmhos/cm	CE $\leq$ 4 mmhos/cm
Betterave à sucre coton, soya, cartha- me, orge	Blé (grain), avoine(g grain) riz, sorgho (grain), mais, lin, tournesol, arachide,	pois

TABLEAU I.7 EQUATIONS POUR CALCULER LE RENDEMENT RELATIF POUR DIFFERENTES CULTURES DEVELOPPEES DANS LES CONDITIONS DE SALINITE.

I. CULTURES TOLERANTES	EQUATION	INTERVALLE D'APPLICATION mmhos/cm $CE_{100} \leq CE_s \leq CE_0$
1.1 Betterave	RR = 140 - 5.0 $CE_s$	7 $\leq CE_s \leq$ 24.0
1.2 Coton	RR = 141.2 - 5.9 $CE_s$	8 $\leq CE_s \leq$ 27.0
1.3 Epinard	RR = 142.1 - 5.3 $CE_s$	2 $\leq$ " $\leq$ 15.0
1.4 Herbes Bermudes	RR = 144.3 - 6.3 $CE_s$	7 $\leq$ " $\leq$ 22.8
II. CULTURES SEMI TOLERANTES		$CE_{100} \leq CE_s \leq CE_0$
2.1 Mais	RR = 125. - 12.5 $CE_s$	2.0 $\leq CE_s \leq$ 10.0
2.2 Riz	RR = 136.6 - 12.2 $CE_s$	3.0 $\leq CE_s \leq$ 11.2
2.3 Canne à sucre	RR = 110.7 - 5.9 $CE_s$	1.8 $\leq CE_s \leq$ 18.8
2.4 Laitue	RR = 115.4 - 12.8 $CE_s$	1.2 $\leq CE_s \leq$ 9.0
2.5 Chou	RR = 117.5 - 9.7 $CE_s$	1.8 $\leq CE_s \leq$ 12.1
2.6 Tomate	RR = 124.6 - 9.9 $CE_s$	2.5 $\leq CE_s \leq$ 12.6
2.7 Oignon	RR = 119.7 - 16.4 $CE_s$	1.2 $\leq CE_s \leq$ 7.3
2.8 Carotte	RR = 114.1 - 14.1 $CE_s$	1.0 $\leq CE_s \leq$ 8.1
2.9 Vigne	RR = 114.6 - 9.7 $CE_s$	1.5 $\leq CE_s \leq$ 11.8
2.10 Alfalfa	RR = 114.5 - 7.2 $CE_s$	2.0 $\leq CE_s \leq$ 15.7
III. CULTURES SENSIBLES	EQUATION	$CE_{100} \leq CE_s \leq CE_0$
3.1 Arachide	RR = 188.9 - 27.8 $CE_s$	3.2 $\leq CE_s \leq$ 6.8
3.2 soja	RR = 200 - 20 $CE_s$	5 $\leq CE_s \leq$ 10.0
3.3 Haricot	RR = 118.9 - 18.9 $CE_s$	1 $\leq CE_s \leq$ 6.3

CULTURES SENSIBLES	EQUATION	$CE_{100} \leq CE_s \leq CE_o$
3.4 Poivron	$RR = 121.4 - 14.3 CE_s$	$1.5 \leq CE_s \leq 8.5$
3.5 Amandier	$RR = 127.3 - 18.2 CE_s$	$1.5 \leq CE_s \leq 7.0$
3.6 Pomme de terre	$RR = 112 - 11.2 CE_s$	$1.8 \leq CE_s \leq 10.0$
3.7 Patate douce	$RR = 116.7 - 11.2 CE_s$	$1.5 \leq CE_s \leq 10.5$
3.8 Fraise	$RR = 133.3 - 33.3 CE_s$	$1.0 \leq CE_s \leq 4.0$
3.9 Citrus	$RR = 129 - 16.1 CE_s$	$1.8 \leq CE_s \leq 8.0$

RR = Rendement relatif exprimé en pourcentage

$CE_o$  = Conductivité électrique du sol à laquelle on n'obtient pas de récolte

$CE_{100}$  = Conductivité électrique du sol au-dessous de laquelle on obtient un rendement maximum.

$CE_s$  = Conductivité électrique du sol mesurée dans l'extrait de saturation



#### 1.2.5.6 Prévention de la salinité

Il va sans dire que l'irrigation peut provoquer la salinité des sols quand elle est pratiquée avec des eaux salines. Parfois, la salinité dérive de l'irrigation avec de l'eau saine mais dans des conditions de drainage déficient. Dans ce cas, la nappe phréatique s'élève et le processus de salinisation s'installe par suite de la remonté capillaire et l'évaporation superficielle.

Pour prévenir la salinisation, on doit toujours faire du drainage un corollaire obligé de l'irrigation. D'autre part, on doit prévoir une dose de lessivage périodique, même dans les conditions normales de sol et d'eau.

#### 1.2.6 Classification des sols pour l'irrigation

Cette classification est essentielle dans les périmètres qu'on va irriguer, elle diffère de la classification pédologique. La classification des sols pour l'irrigation se fait en tenant compte de leurs caractéristiques physico-chimiques. En général, les sols sont groupés en quatre classes.

Les facteurs qui sont considérés dans cette classification sont les suivantes:

- |                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 1o) La profondeur du sol        | "S" |
| 2o) La pente                    | "p" |
| 3o) La salinité et l'alcalinité | "A" |
| 4o) Le drainage                 | "D" |
| 5o) Les risques d'inondation    | "I" |
| 6o) L'érosion                   | "E" |

Dans le tableau 1,8, se trouve la classification proposée par ORTIZ VILLANUEVA (1977)

#### 1.2.6.1 Définition des classes

- a- Classe I Ce sont les meilleures terres d'un projet d'irrigation, pratiquement, elles nécessitent peu d'investissements pour leur mise en valeur.
- b- Classe II Ce sont des terres qui à cause de quelque déficience des facteurs de classification précités requièrent des coûts modérés pour leur exploitation par irrigation. Elles peuvent facilement passer à la classe I après correction des facteurs limitants.
- c- Classe III Ce sont des terres qui pour être exploitées sous irrigation demandent des investissements considérables, parfois, on n'est pas sûr après traitement de pouvoir lever toutes les contraintes.
- d- Classe IV Ces sols ne sont pas cultivables sous irrigation. Leur récupération n'est pas économique.

#### 1.2.6.2 Détermination de la classe de sols

La classe de sols se représente par un indice qui comprend un numérateur et un dénominateur. Le numérateur est un nombre variant de I à IV, le dénominateur présente le ou les initiales des facteurs qui déterminent la classe.

Par exemple  $\frac{II}{SD}$  indique: sol de deuxième classe limitée par la profondeur du sol et les conditions de drainage. Les facteurs qui ne figurent pas au dénominateur sont moins limitants.

TABLEAU I.8 Classification des sols pour l'irrigation (D'après Villanueva, 1977)

CLASSE	"S"	"P"	"A"	"D"	"I"	"E"
	COLOR : SUR UNE CARTE PROFONDEUR	TOPOGRAPHIE : (Pente %)	SALINITE ET : ALCALINITE (1) :	DRAINAGE : (2)	INONDATION	EROSION
I	> 1 m	0-6	0-0,2% et : PSE < 15% :	Sans problème	Non sujet aux inondations	Sans problèmes
II	.4 - 1 m	6-12	0,2 - 0,35% : PSE < 15% :	Cuvettes (dépressions Possibilités d'inondation)	Erosion modérée entre 20 et 25% de l'horizon A exportés	
III	.25 - .40 m	12-20	0,35-0,65% : PSE ou 15%	Zones avec eau pendant la saison sèche	Fréquentement inondé	Erosion sévère entre 25 et 70% de l'horizon A exportés
IV	< .25 m	> 20	> 0,65% : PSE > 15%	Drainage difficile	Inondé	Erosion sévère plus de 70% de l'horizon A et jusqu'à 30% de B exportés

(1) PSE = Pourcentage de sodium échangeables par rapport à la capacité d'échange totale

(2) En ce qui concerne le drainage:

- Classe I : Pas besoin de structures de drainage la nappe phréatique est à + de 1 m
- Classe II : Réclame des structures de drainage de coût relativement faible, la nappe phréatique est à plus de 1 m.
- Classe III : Réclame des structures de drainage de rentabilité douteuse
- Classe IV : Le coût des structures de drainage dans ces conditions est prohibitif. Les terres de cette classe peuvent pas être exploitées avec profit.

L'EAU DANS LE SYSTEME "SOL-PLANTE-EAU"

Objectif

Après avoir complété cette partie, l'intéressé sera en mesure de:

- 1o) Décrire et d'utiliser les méthodes qui permettent d'estimer l'humidité du sol sur le terrain et citer les avantages et inconvénients de chaque procédé.
- 2o) Définir les humidités caractéristiques du sol à savoir: l'humidité à saturation, l'humidité à la capacité au champ, l'humidité au point de flétrissement.
- 3o) Expliquer l'utilisation des humidités caractéristiques dans la planification de l'irrigation et du drainage.
- 4o) Définir la perméabilité du sol et décrire les méthodes qui permettent de l'estimer ou de la mesurer.
- 5o) Classer un sol en fonction de sa perméabilité et expliquer l'utilisation de ce paramètre pour planifier l'irrigation et le drainage.

Points clés à retenir

- 1o) La capacité de rétention au champ est un paramètre qui détermine le volume d'eau à appliquer au sol pour créer des conditions optimales de croissance des végétaux.
- 2o) Le point de flétrissement temporaire ou naissant est défini comme étant la teneur en eau à laquelle la paire la plus basse de vraies feuilles sur une plante se flétriront. Ce-

pendant, le développement de la plante peut se poursuivre, si elle est replacée dans les conditions optimales.

- 30) Le point de flétrissement correspond à la teneur en eau où les plantes se flétrissent sans pouvoir s'en remettre.
- 40) La capacité pour l'eau utile totale correspond à la fourchette entre les teneurs en eau, entre le point de flétrissement permanent et la capacité au champ.
- 50) La perméabilité du sol détermine la facilité avec laquelle:
  - L'eau traverse la surface du sol et
  - Pénètre dans le sous-sol.

#### L'eau dans le système "sol-plante-eau"

Le sol sans eau, n'est qu'un support inerte pour la plante, car privé d'eau le végétal ne peut pas se développer. De plus, les phénomènes de transformation et de décomposition de la M.O. ne se manifestent pas en absence de l'eau liquide. Par conséquent, l'eau est un agent essentiel de la formation du sol et de sa productivité. Dans les zones, où les pluies sont insuffisantes, l'irrigation est une pratique culturale qui assure aux plantes un approvisionnement hydrique adéquat et continu.

Le planificateur d'un programme d'irrigation doit s'intéresser à deux types de relations entre le sol et l'eau, ce sont:

- 10) Les propriétés du sol comme réservoir d'eau pour la plante
- 20) Les propriétés du sol à se laisser pénétrer par l'eau

en surface et à la laisser circuler dans sa masse

## 2.1 Le sol et la rétention d'eau

### 2.1.1 Les différents niveaux d'humidité du sol

Le sol constitue un milieu convenable pour les racines, lorsqu'un équilibre est respecté entre les trois phases: l'air est nécessaire à la respiration des racines et l'eau doit pouvoir leur être cédée sans difficulté. Ainsi distingue-t-on différents niveaux d'humidité dans le sol qui correspondent à des définitions précises; ces niveaux d'humidité sont:

#### 2.1.1.1 Humidité à la saturation (HS)

C'est l'humidité du sol lorsque l'eau occupe toute la porosité. Le sol ne contient plus d'air.

#### 2.1.1.2 Humidité à la capacité au champ (HCC)

C'est l'humidité d'un sol ressuyé, l'eau occupe la microporosité tandis que la macroporosité contient de l'air. Elle correspond à l'humidité pour laquelle la force de succion du sol est de 1/3 atmosphère.

#### 2.1.1.3 Humidité équivalente (HE)

Cette mesure est faite au laboratoire, on extrait l'eau d'un échantillon de sol à saturation, au moyen d'une centrifugeuse produisant une accélération de 1 000 fois l'accélération de la pesanteur pendant 30 minutes. L'humidité du sol après traitement est proche de HCC.

#### 2.1.1.4 Humidité de rupture du lien capillaire ou Humidité critique (H.C.)

C'est l'humidité en-dessous de laquelle la plante commence à souffrir d'un déficit hydrique. Elle correspond à une pression de succion dans la feuille de 8 à 10 atmosphères, mais ne se réfère pas à une valeur fixe pour le sol.

#### 2.1.1.5 Humidité au point de flétrissement permanent (HPF)

C'est l'humidité au-dessous de laquelle la plante subit des dommages irréversibles à cause de la sécheresse. Elle correspond à l'humidité pour laquelle la force de succion du sol équilibre celle des cellules des racines: le débit d'eau du sol à la plante s'annule. On convient en général de la définir comme correspondant à une pression de succion dans le sol de 15 atm.

#### 2.1.2 Expression de l'humidité du sol

L'humidité d'un sol peut être exprimée, soit en humidité pondérale, soit en humidité volumique ou encore soit en hauteur d'eau

##### 2.1.2.1 Humidité pondérale

Elle est définie par la relation:

$$H_p = \frac{P_e}{P_{ss}} \times 100 = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100 \quad (2.1)$$

avec

$H_p$  = Humidité du sol en pourcentage poids

$P_e$  = Poids de l'eau du sol

$P_{ss}$  = Poids du sol séché à 105°C

$P_{sh}$  = Poids du sol humide

### 2.1.2.2. Humidité volumique

Elle est définie par l'expression

$$H_v = \frac{V_e}{V_s} \times 100 = H_p \times f_a \quad (2.2)$$

avec

$H_v$  = Humidité du sol en pourcentage volume

$V_e$  = Volume de l'eau du sol

$V_s$  = Volume du sol en place

$f_a$  = Densité apparente

### 2.1.2.3. Humidité en Hauteur d'eau

Elle s'exprime comme suit:

$$L = H_v \cdot E \quad (2.3)$$

avec

$L$  = Hauteur d'eau que contient le sol

$E$  = Epaisseur du sol considéré

### 2.1.3. Mesure de l'humidité du sol

Pour mesurer l'humidité du sol, on utilise des méthodes directes et des méthodes indirectes.



### 2.1.3.1 Méthodes directes

La méthode directe la plus utilisée est la gravimétrie. Elle peut être décrite comme suit:

Un échantillon de sol est pesé frais, puis après séchage à l'étuve pendant 24 heures à 105°C. L'humidité pondérale est alors déterminée à partir de l'équation 2.1.

Moyennant certaines précautions d'échantillonnage et de manipulation, cette méthode est une des plus précises.

### 2.1.3.2 Méthodes indirectes.

Parmi ces méthodes, nous mentionnons les deux qui sont les plus employées:

- a) La méthode du tensiomètre,
- b) La méthode de la résistance électrique.

Ces méthodes se basent sur la tension de l'eau dans le sol pour estimer l'humidité. En effet l'eau se déplace entre deux points s'il existe une force ou un gradient potentiel qui agit entre ces points. La direction du flux va du potentiel le plus élevé au plus faible, l'eau circule des zones les plus humides vers les plus sèches. Ce potentiel s'appelle potentiel hydrique.

Le potentiel hydrique correspond à l'énergie qu'il est nécessaire de fournir à l'unité de masse d'eau pure pour la faire passer au cours d'une transformation réversible, de l'état d'eau libre à la pression atmosphérique, à l'état qu'elle a dans le système considéré.

Par convention le potentiel de l'eau pure est nul à la pression atmosphérique, négatif en milieu non saturé et positif pour l'eau sous pression.

Dans la pratique, le potentiel hydrique s'exprime en atmosphères en bars, en  $\text{kg/cm}^2$  ou en mètres de colonne d'eau. On parle alors plutôt de "tension", que l'on donne généralement en valeur absolue sans tenir compte du signe.

Le potentiel hydrique total dans le sol est la résultante de trois potentiels partiels.

- 1o) Le potentiel gravitationnel ou newtonien, dû à l'action de la pesanteur et aux forces de pression. Il est défini par rapport à un plan horizontal de référence.
- 2o) Le potentiel matriciel dû aux forces de capillarité, auxquelles s'ajoutent l'adhésion superficielle sur certaines particules du sol.
- 3o) Le potentiel osmotique dû à la présence de sels dissous dans l'eau.

Si on désigne par "h" le potentiel hydrique total de l'eau du sol exprimé en centimètres de colonne d'eau, il est très commode d'obtenir un indice du potentiel hydrique défini comme suit:

$$pF = \log_{10} h \quad (2.4)$$

avec:

pF = Le logarithme base 10 du potentiel hydrique exprimé en centimètres de colonne d'eau.

Le tableau II-1 donne certaines correspondances entre les valeurs caractéristiques de la tension (potentiel) de l'eau du sol exprimées en cm de colonne d'eau, ou en atmosphères.

TABLEAU II-1 Quelques valeurs caractéristiques du pF

Tension		pF	Observations
Atm.	Colonne d'eau en cm		
0.10	100	2.0	Capacité au champ des sols grossiers
0.31	316	2.5	" " " " " moyens
0.97	1000	3.0	" " " " " lourds
15.30	15850	4.2	Point de flétrissement permanent
31.00	31600	4	Eau hygroscopique
10000	10000000	7.0	Sol séché à l'étuve à 105°C

La tension de l'eau du sol est en relation étroite avec sa teneur en eau: le pF varie en raison inverse de l'humidité du sol. La mesure du pF permet donc une mesure indirecte de l'humidité, à condition de tenir compte des points suivants:

- 1o) La relation tension-humidité est différente pour chaque type de sol (voir fig. II.1)
- 2o) Cette relation n'est pas la même en phase d'humectation et en phase de dessiccation. On observe donc un retard ou "hystérésis". Ce phénomène est très nettement marqué sur les sols riches en argiles. (fig. II.1).
- 3o) Le pF est d'autant plus élevé que la vitesse de dessèchement est plus rapide.

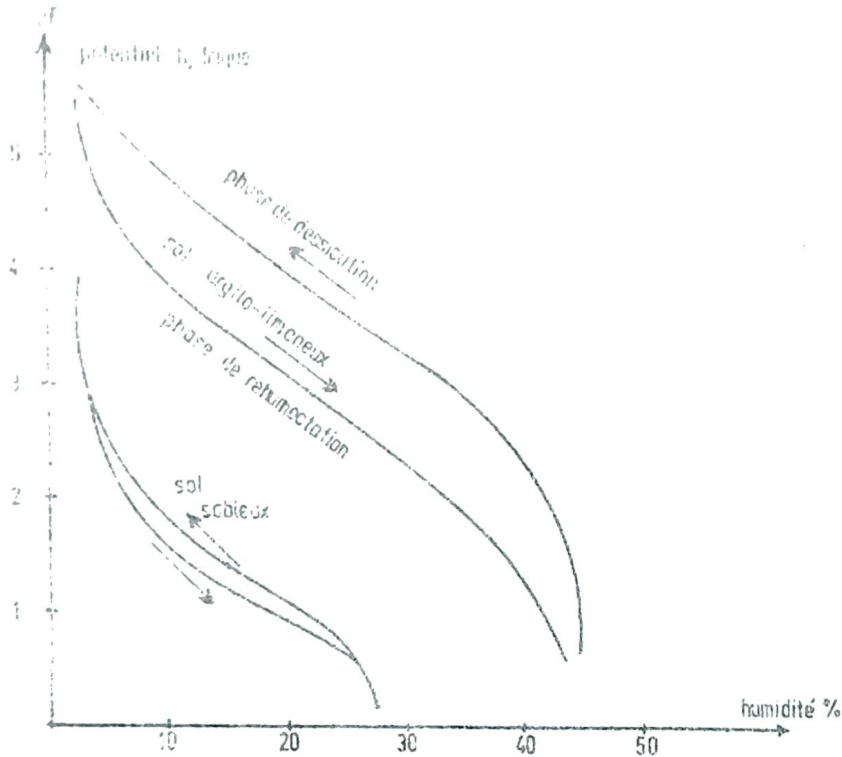


Fig. II-1 Relation potentielle - humidité (effet d'hystérésis)

### 1. Méthode du tensiomètre

Le tensiomètre mesure la tension de l'humidité du sol. Il est constitué par une bougie poreuse remplie d'eau que l'on place dans le sol. La succion du sol provoque à l'intérieur de la bougie une dépression que l'on mesure à l'aide d'un manomètre.

Dans la pratique, l'utilisation du tensiomètre présente certaines difficultés:

- a) L'appareil ne permet pas de mesurer des tensions élevées. Il donne des valeurs exactes pour des tensions inférieures à 0,8 atmosphère. Il est efficace seulement sur des sols sablonneux où 85% de l'eau utile

se trouvent à des tensions inférieures à 1 atmosphère.

- b) Le temps de réponse est long
- c) Il y a nécessité de purger périodiquement l'appareil pour éliminer l'air dissous qui peut y pénétrer.

Le tensiomètre en général s'adapte à des cultures qui nécessitent de fréquentes irrigations.

## 2. Méthode de la résistance électrique

Les humidimètres de ce groupe se basent sur le principe suivant lequel un changement dans le taux d'humidité du sol provoque une variation dans la résistance que le sol oppose au passage du courant électrique.

G. Bouyoucos de Michigan en 1940 présenta un modèle qu'on utilise jusqu'à présent.

L'humidité de Bouyoucos a un inconvénient majeur: "Pour les valeurs proches de la capacité au champ, la variation de la résistance par rapport au taux d'humidité est non significative". Par conséquent, pour les valeurs élevées de l'humidité utile, l'appareil n'est pas fiable.

### 2.1.3.3 Estimation de l'humidité du sol par la méthode de l'aspect et du toucher

C'est une des méthodes parmi les plus anciennes et des plus employées pour estimer le pourcentage d'humidité du sol. Le tableau II.2 présente les critères adoptés dans l'application de cette méthode.

TABLEAU 11-2 INDICATIONS POUR JUGER LA QUANTITE D'EAU  
DONT DISPOSENT LES PLANTES

Toucher ou aspect du sol

Quantité d'eau disponible dans le sol	Texture grossière	Texture modérée grossière	Texture moyenne	Texture fine et très fine
0 à 25%	Sec, non aggloméré, grains isolés s'écoule entre les doigts	Sec, non aggloméré, s'écoule entre les doigts	Poudreux et sec, formant parfois une légère croûte mais facile à pulvériser.	Poudreux et sec, formant parfois une légère croûte mais facile à pulvériser.
25 à 50%	Semble être sec, ne forme pas de boule sous l'effet de la pression (1)	Semble être sec, ne forme pas de boule (1)	Friable mais forme une boule sous l'effet de la pression	Légerement friable forme une boule sous l'effet de la pression (1)
50 à 75%	Semble être sec. Ne forme pas de boule sous l'effet de la pression	Tend à s'agglomérer sous l'effet de la pression mais reste rarement dans cet état.	Forme une boule plastique qui se fend parfois sous l'effet de la pression.	Forme une boule que se déshiquette entre le pouce et l'index
75% jusqu'à capacité de rétention au champ (100%)	Tend à coller légèrement. Forme parfois une boule peu résistante sous l'effet de la pression.	Forme une boule peu résistante qui se casse facilement, ne se fend pas.	Forme une boule très friable, se fend facilement si sa teneur en argile est relativement élevée	Se déshiquette facilement entre les doigts lisse au toucher
A la capacité de rétention au champ (100%)	Sous l'effet de la pression il ne coule pas d'eau sur le sol mais il reste sur la main le tracé de la Boule	Sous l'effet de la pression il ne sort pas d'eau et le contour de la boule reste indiqué sur la main	Sous l'effet de la pression il ne sort pas d'eau à l'état libre, mais le pourtour humide de la boule est marqué sur la main.	Sous l'effet de la pression il ne sort pas d'eau à l'état libre, mais le pourtour humide de la boule est marqué sur la main.

(1) On forme une boule en pressant fortement une poignée de terre.

## 2.1.4 Classification de l'eau du sol en fonction des niveaux d'humidité

Etant donné que la totalité de l'eau du sol ne peut pas être utilisée par la plante, il convient de préciser la disponibilité de l'eau pour la plante. La figure II.3 établit les relations existant entre les humidités caractéristiques et les volumes d'eau correspondant.

### 2.1.4.1 L'eau de gravité

C'est le volume d'eau retenu par le sol entre l'humidité à la saturation ( $H_s$ ) et l'humidité à la capacité au champ (HCC). Elle occupe les macropores et se draine par gravité de la zone des racines. Cette eau ne profite pas aux plantes (sauf le riz) en raison de l'absence d'oxygène. HCC correspond approximativement au pF 2.8 ( 2 à 3 suivant la texture).

### 2.1.4.2 L'eau utile ou réserve utile (R.U.)

C'est l'eau retenue entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. Cependant, on ne peut pas considérer que toute la réserve utile est facilement utilisable, car si l'humidité du sol atteint HPF, la plante se fait irréversiblement.

$$RU = (HCC - HPF) \cdot \rho_a \cdot E \quad (2.5)$$

HPF Correspond approximativement au pF, 4.2

HCC et HPF sont des humidité pondérales en %

$\rho_a$  Densité apparente du sol,

E Profondeur du sol

### 2.1.4.3 Réserve facilement utilisable

C'est l'eau retenue entre l'humidité à la capacité au champ (HCC) et l'humidité critique (HC)

$$RFU = (HCC - HC) \cdot \rho_a \cdot E \quad 2.6$$

où

HC = Humidité pondérale en %

Dans la pratique, il est très difficile d'avoir une estimation satisfaisante de HC et l'on évalue RFU à 2/3 RU.

La fig 11.4 montre une relation générale entre la texture du sol, déterminée par analyse mécanique et la fraction volumique de l'eau utile totale ou eau disponible.



FigII.2 Etats de l'eau dans le sol  
son utilisation par les plantes

CARACTERISTIQUE DU SOL VIS A VIS DE L'EAU	UTILISATION DE L'EAU PAR LES PLANTES	STADES PARTICULIERS	APPLICATION IRRIGATION
<p>EAU DE GRAVITE</p> <p>CAPACITE MAXIMUM POUR L'EAU</p> <p>CAPACITE DE STOCKAGE OU DE RETENTION</p> <p>RESERVE UTILE reserve facilement utilisable 30%</p> <p>15%</p> <p>CAPACITE AU POINT DE FLETRISSEMENT</p> <p>55%</p>	<p>eau tres mobile tres accroisement utilisee par les plantes</p> <p>8 microns</p>	SATURATION	<p>— dose pratique d'irrigation</p> <p>— dose theorique d'irrigation</p> <p>— dose exceptionnelle d'irrigation apres longue secheresse</p>
	<p>eau mobile</p> <p>source essentielle d'alimentation des vegetaux</p>	RETENTION	
	<p>eau peu mobile difficilement utilisable</p> <p>0,2 micron</p>	LIMITE PRATIQUE DE DESSICATION	
	<p>eau tres peu mobile</p> <p>utilisable qu'au contact des poils absorbants des racines des vegetaux</p>	FLETRISSEMENT	
	<p>eau liee aux particules solides.</p>		

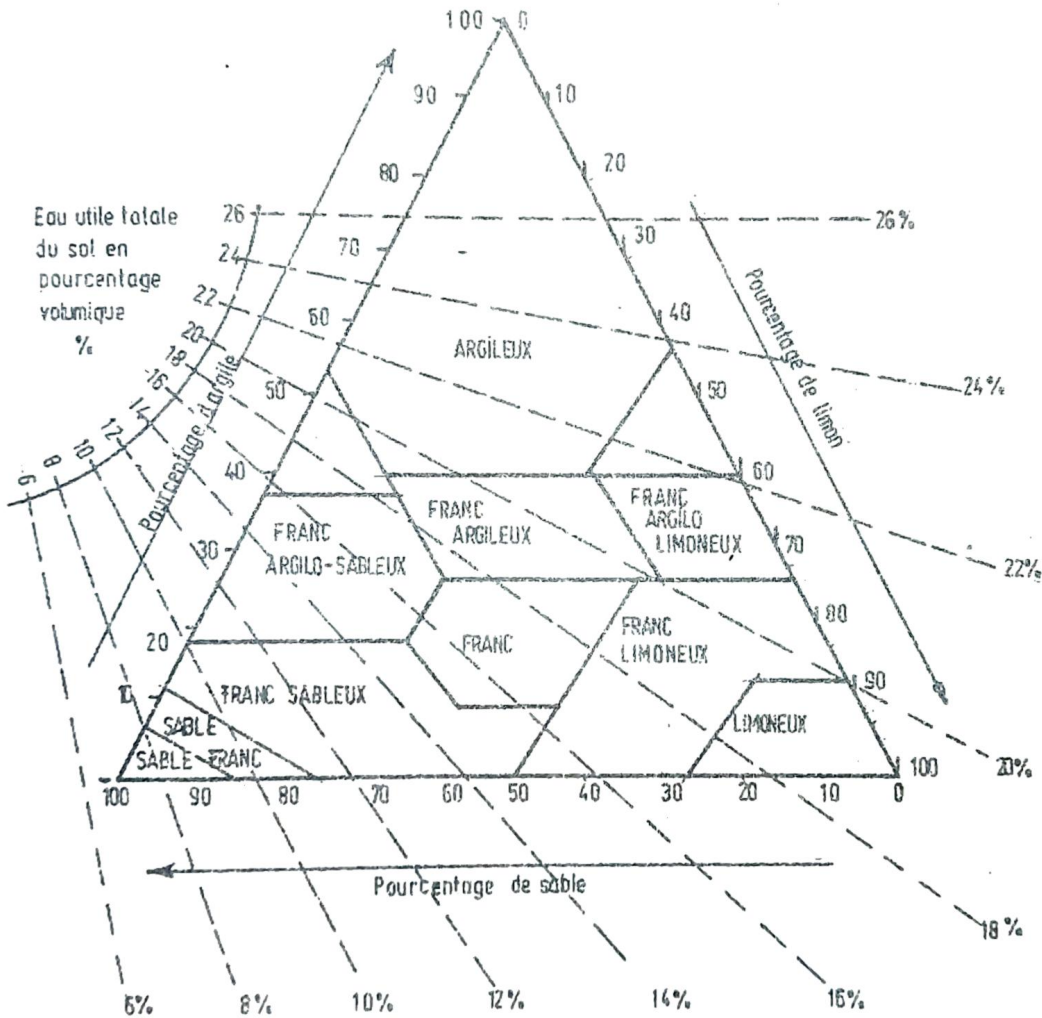


Fig. II. 3 Relation entre l'eau utile totale du sol en pourcentage volumique et sa texture.

## 2.2 Mouvement de l'eau dans le sol

Le mouvement de l'eau dans le sol est fonction du potentiel de gravité, du potentiel matriciel (capillarité) et de la perméabilité du sol.

La perméabilité du sol désigne la facilité avec laquelle le sol conduit ou transporte l'eau. La perméabilité d'un sol est définie par trois concepts interdépendants:

- 1o) La vitesse d'infiltration qui est la vitesse de pénétration de l'eau à la surface. Elle détermine la relation entre l'absorption et le ruissellement;
- 2o) La vitesse de percolation du sous-sol qui détermine le drainage interne du profil du sol et
- 3o) La conductivité hydraulique qui est le facteur de proportion dans la loi de Darcy. Cette caractéristique du sol est importante dans le drainage souterrain (voir fig.II.5)

			Condition d'humidité	Mesure	Objectifs
Couche supérieure du sol		vitesse d'infiltration	non saturé	Infiltromètre (au sec)	Application de l'eau d'irrigation
Sous-sol					
	couche dense du sol	percolation	presque saturé	infiltromètre (Humide)	Drainage interne
	nappe phréatique	conductivité hydraulique	saturé	piézomètre	Drainage souterrain
couche Imperméable					

Fig.II.4 Les trois aspects de la perméabilité du sol

### 2.2.1 La vitesse d'infiltration

Dans un projet d'irrigation et/ou de drainage, il est fondamental de connaître la vitesse avec laquelle l'eau de pluie ou d'irrigation pénètre dans le sol. L'infiltration trop lente ou trop rapide cause des problèmes au niveau de la parcelle, par conséquent, il est nécessaire de réaliser des tests d'infiltration dans la planification de l'irrigation ou du drainage.

Cette propriété du sol est exprimée mathématiquement comme suit:

$$I = at^n \quad 2.7$$

avec

- I = L'infiltration accumulée i.e. la hauteur d'eau qui s'infiltré à travers une surface de sol horizontal unitaire, en une période donnée.
- a = Est une constante pour des conditions données du sol
- n = Est une constante pour un taux d'humidité donné, elle est toujours positive mais inférieure à l'unité.

A partir de l'équation 2.7, on peut déduire différentes quantités physiques qui caractérisent une partie du processus d'infiltration.

Ce sont:

#### 2.2.1.1. La vitesse d'infiltration instantanée (II)

C'est la hauteur d'eau qui s'infiltré à travers le sol à l'instant  $t_f$ . C'est la dérivée de l'équation 2.7, elle s'exprime comme suit:

$$I_i = ant^{n-1} \quad 2.8$$

2.2.1.2. La vitesse d'infiltration ( $I_m$ )

De même on peut déduire l'infiltration moyenne  $I_m$  à partir de l'équation 2.7, en divisant 1 entre  $t$

$$I_m = at^{n-1} \quad 2.9$$

2.2.1.3 La vitesse d'infiltration basique ( $I_b$ )

Au début d'un test, l'infiltration est rapide, puis elle diminue. Il arrive un moment où pratiquement " $I_i$ " devient constante. Le temps que prend " $I_i$ " pour se stabiliser est le temps basique qui s'exprime comme suit:

$$t_b = 600 (1 - n) \quad 2.10$$

avec

$$t_b = \text{Temps basique, en minutes}$$

Si dans l'expression 2,8, on remplace  $t$  par  $t_b$ , on peut écrire

$$I_b = an [600 (1-n)]^{n-1} \quad 2.11$$

avec

$$I_b = \text{Vitesse d'infiltration/minute}$$

$$t_b \text{ est une fonction de } n.$$

#### 2.2.1.4. Le temps d'application d'une hauteur d'eau (t)

C'est le temps nécessaire en minutes pour appliquer une hauteur d'eau I. En déduisant "t" de l'équation 2.7 on a :

$$t = \left(\frac{I}{a}\right)^{1/n} \quad 2.12$$

#### 2.2.1.5. Expression et interprétation des valeurs de la vitesse d'infiltration

En général, les sols sableux ont une infiltration variant entre 6 et 12 cm/hr, celle des sols limoneux entre 0,5 et 2cm/hr, tandis que celle des sols argileux est inférieure à 0,5 cm/hr. Sur le tableau II.3, on présente les limites des diverses classes d'infiltration.

VAN BEERS, en tenant compte du temps en heures pour appliquer une hauteur d'eau de 10 cm, a proposé une classification qu'on peut apprécier au tableau II.4

TABLEAU II.3 Classification des vitesses d'infiltration (voir Rickard et Cossens 1965)

Classe	Vitesse d'infiltration basique en mm/h	Désignation de l'infiltration	Texture du sol
I	moins de 2.5	très lente	argileux
II	2.5 - 15.0	lente	limon argileux
III	15.0 - 28.0	moyenne	franc
IV	28.0 - 53.0	élevée	limon sableux
V	plus de 53.0	très élevée	sableux

TABLFAU.II.4. Classes d'infiltration en fonction du temps d'application d'une hauteur d'eau de 10 cm.

Classe	Temps en heures
Marginal (trop lente)	20 - 40
défavorable (lente)	8 - 20
favorable	15 - 8
défavorable (rapide)	1.5 - 1.8
Marginale (trop rapide)	1.0 - 0.5

#### 2.2.1.6. Mesure de la vitesse d'infiltration

La méthode la plus employée pour mesurer l'infiltration est celle de l'Infiltromètre à double anneau ou méthode de MUNTZ modifiée.

#### 2.2.2 La vitesse de percolation

La percolation est différente de l'infiltration, elle se réfère à la quantité d'eau qui traverse une surface horizontale unitaire à une profondeur donnée de la masse du sol par unité de temps. En général, elle est égale à l'infiltration dans un sol saturé. Dans les conditions de non saturation, l'infiltration est égale à la somme des percolations et de l'accumulation de l'eau dans le sol. La percolation alimente l'eau des puits et des sources.



### 2.2.3 La conductivité hydraulique (K)

C'est la caractéristique physique des sols la plus importante à déterminer dans un projet de drainage souterrain. Elle dépend de la géométrie des pores du sol. La conductivité hydraulique est le facteur de proportion "k" dans l'équation de Darcy. En effet, d'après Darcy (1856), le flux de l'eau qui passe dans un sol saturé par unité de temps peut être exprimé comme suit:

$$Q = \frac{k \Delta h}{L} S \quad 2.13$$

avec

- Q = Le débit à travers le substrat
- h = Perte de charge
- L = Longueur de la masse de sol considérée
- S = Superficie de la section transversale de la masse de sol
- K = Constante de proportionnalité, qui dépend du type de sol.

K exprime la plus ou moins grande facilité avec laquelle l'eau capillaire se déplace dans le sol pour un gradient de tension donné. Elle est élevée pour les sols légers et faible pour les sols lourds. K varie avec l'état de l'humidité du sol et est d'autant plus élevée que le sol est plus humide.

#### 2.2.3.1. Mesure et expression de K

La conductivité hydraulique peut être mesurée au laboratoire ou

en plein champ. Pour les besoins de ce cours, nous mentionnerons deux parmi les méthodes les plus courantes employées in situ, ce sont :

- 1o) La méthode du piézomètre employée en présence d'une nappe phréatique.
- 2o) La méthode du trou de tarière inversé employée en absence de nappe ou quand la nappe est profonde. Sur le tableau 2.5 on présente les classes de conductivité hydraulique généralement adoptées.

TABLEAU 2.5. Les classes de conductivité hydraulique, reportées par Ortiz Villanueva, Chapingo, Mexico 1977.

Classe	K en mm/h	Désignation
I	moins 1.5	Très lente
II	1.5 et 5.0	lente
III	5 à 150	Modérée
IV	150 à 250	Rapide
V	plus de 250	Très rapide

## CHAPITRE III

## LA PLANTE DANS LE SYSTEME

## SOL - PLANTE - EAU

## 3.1.1 Généralités

Dans la détermination des besoins en eau globaux au niveau d'un système d'irrigation, il est fondamental de pouvoir calculer la consommation d'eau de la végétation. Ce facteur est non seulement essentiel pour la planification du réseau d'irrigation, mais conditionne également l'efficacité de l'exploitation de la ressource en eau au niveau de la parcelle. La nécessité d'obtenir cette information est particulièrement urgente dans les régions où les données sont rares ou inexistantes.

## 3.1.2 Objectifs du chapitre:

Rendre le lecteur capable:

- D'identifier les facteurs qui déterminent la consommation d'eau du végétal.
- D'expliquer le processus par lequel se fait la consommation d'eau (Evapotranspiration)
- D'employer les formules qui permettent d'estimer l'évapotranspiration.

## 3.1.3 Eléments de base à retenir

- L'évapotranspiration réelle dépend de facteurs physiques ou climatiques et de facteurs édaphiques et cultureaux.
- L'évapotranspiration potentielle ou pouvoir évaporant de l'atmosphère dépend du climat.

- Dans les régions où les mesures d'évapotranspiration réelle ne sont pas disponibles, elle peut être estimée valablement à partir de formules. Pour les régions tropicales, on recommande la formule de Blaney et Criddle et celle de Hargreaves.
- Il y a des périodes clés où la satisfaction des besoins du végétal est importante pour l'obtention de bons rendements, ce sont les périodes critiques

## 3.2

## La plante dans le système sol-plante-eau

L'eau est un élément essentiel au développement des végétaux. Elle a deux fonctions:

- 1o) Elle est le principal constituant des tissus dont la teneur en eau varie de 60 à 90% du poids frais, selon leur nature, leur état physiologique et leur âge.
- 2o) Elle assure le transport des éléments nutritifs et la régulation thermique au niveau des feuilles.

Ainsi pour que la plante puisse s'adapter sur un sol, il faut qu'elle y trouve de l'eau; laquelle pénètre dans la plante à travers les racines. Par conséquent, pour formuler un programme adéquat d'irrigation et/ou de drainage, le concepteur doit connaître:

- a) D'une part, les caractéristiques des racines des plantes associées à leurs capacités d'explorer le sol pour y puiser l'eau
- b) D'autre part, la façon dont les plantes consomment l'eau du sol et les facteurs qui régissent le taux de consommation.

### 3.2.1. Caractéristiques des racines des plantes et l'exploration du sol.

La plante extrait l'eau du sol à travers les poils absorbants de ses racines. La profondeur de sol qu'elle peut ainsi explorer pour y extraire l'eau dépend de deux phénomènes:

- a) Le mouvement capillaire de l'eau dans le sol;
- b) La croissance des racines en sol humide.

#### 3.2.1.1 Mouvement capillaire de l'eau du sol vers les racines

Le flux de l'eau du sol aux racines se produit en phase liquide et découle du fait que le potentiel hydrique de la plante soit inférieur à celui de la solution du sol. En effet, quand les racines absorbent l'eau du sol adjacent, la tension de l'eau augmente et il y a un flux vers ces points de plus faible potentiel hydrique. L'efficacité du phénomène dépend de la réserve en eau du sol.

#### 3.2.1.2 Croissance des racines en sol humide

Durant les périodes favorables de croissance, les racines s'allongent en fonction de la disponibilité optimale de l'eau du sol. elles recherchent les conditions d'humidité optimale. Ainsi les plantes peuvent s'alimenter en'eau même en absence du processus capillaire. Quand les racines se sont bien développées durant la période de croissance optimale, la plante peut extraire l'eau des couches profondes. Si l'eau retenue en surface s'épuise, les besoins des plantes peuvent être satisfaits à partir de l'humidité des couches sous-jacentes.

Au contraire, si les plantes ont eu des problèmes au cours de la phase initiale de croissance, elles développent un système racinaire superficiel et peuvent souffrir en période de sécheresse postérieure même si la nappe est peu profonde.

On doit souligner que dans beaucoup de terrains, une couche dure peut limiter le développement racinaire aux 15 à 20 premiers centimètres du sol superficiel. La racine se trouve dans l'impossibilité de pénétrer la couche dure. Par conséquent, sur les sols peu profonds, les racines ne présentent pas leur système de développement normal.

Sur le tableau III-1 sont reportées les profondeurs moyennes d'enracinement des principales plantes cultivées dans des conditions optimales. Toutefois, on peut observer de fortes déviations à ces valeurs associées à des contraintes de sols et d'humidité.

### 3.2.1.3 Adaptation des plantes aux conditions de l'humidité du sol et différents types de racines.

Les différentes espèces végétales ont des capacités différentes à s'adapter aux excès et au manque d'eau du sol. En tenant compte de cette caractéristique, les plantes sont groupées en trois classes écologiques:

- a) les hydrophytes;
- b) les xerophytes;
- c) les mésophytes.

Sur la figure III-1, on présente la relation de ces groupes avec le taux d'humidité du sol.

Les hydrophytes réunissent les plantes aquatiques c'est à dire celles qui s'adaptent aux conditions de sol saturé. Elles développent en conséquence une structure interne pelliculaire qui facilite l'aération des racines.

Les xérophytes résistent et survivent aux sécheresses périodiques, elles développent un système racinaire très dense mais superficiel.

Les mésophytes développent un système racinaire modérément profond et groupent les plantes qui ne peuvent pas vivre sur les sols saturés ou dans les habitats secs. Elles recherchent les conditions d'humidité entre la capacité au champ et le point de flétrissement.

3.2.1.4 Les patrons de développement racinaire des plantes cultivées varient non seulement avec l'espèce et la variété de la plante considérée, mais aussi avec les caractéristiques physico-chimiques des sols telles: la texture, la structure, la compacité, l'aération, le taux d'humidité, la fertilité et la salinité.

Généralement, sur un sol profond, plus ou moins uniforme, les plantes concentrent la majorité de leurs racines dans les 30 à 60 premiers centimètres du sol. L'intensité de l'extraction de l'eau du sol par la plante est très élevée dans cette zone. De plus, si on tient compte que l'évaporation se fait à partir des couches supérieures du sol; il en résulte que l'eau de cette zone s'épuise assez rapidement. Pour que la plante utilise de façon intensive l'eau des couches inférieures il faut que le potentiel hydrique des couches superficielles diminue. Par conséquent, dans les conditions normales d'extraction de l'eau du sol, la consommation de l'eau décroît de haut en bas. Le standard d'extraction de l'eau du sol peut se résumer comme suit (figure III-2):

- 1o) 40% de l'eau extraite par la plante proviennent du premier quart de la zone des racines.
- 2o) 30% proviennent du deuxième quart;
- 3o) 20% proviennent du troisième quart;
- 4o) et 10% proviennent du quatrième quart.

Ces références présentent pour les différentes cultures des écarts de l'ordre de  $\pm 10\%$ .

Cependant, dans certains cas, quand il existe une nappe phréatique peu profonde qui alimente la zone radiculaire par capillarité, le patron d'extraction peut présenter une inversion par rapport à celui qui vient d'être décrit.



Tableau III-1 Profondeurs moyennes d'enracinement des plantes couramment cultivées.

Cultures	Profondeur en mètres		Cultures	Profondeur en mètres	
1- Alfalfa	1.5	3.0	21 Herbes fourragères	0.9	1.2
2- Artichaut	1.0	3.0	22 Légumineuses	0.5	1.25
3- Asperge	1.8	3.0	23 Poivrons	0.40	1.0
4- Haricot	0.5	0.9	24 Noix	1.2	1.8
5- Betterave à sucre	1.2	1.8	25 Oignon		0,45
6- Betterave de table	0.6	0.9	26 Arachides		0,60
7- Aubergines	0,75	1.2	27 Petit pois		0,60
8- Crucifères	0,3	0,6	28 Pomme de terre	0.9	1.20
9- Cantaloupe	1.2	1.8	29 Patate douce	1.2	1.80
10- Carottes	0.6	0.9	30 Tomate	0.4	1.00
11- Chou-fleur		0.6	31 Fraises		0.90
12- Agrumes	1.3	2.0	32 Soya	0.9	1.20
13- Mais	1.2	1.5	33 Curcubitacées	0.75	1.25
14- Canne à sucre		1.0	34 Radis	0,30	0.45
15 Coton	1.2	1.8	35 Epinards		0.60
16 Concombre	0.6	0.9	36 Tabac		1.20
17 Fruits caduques	2.0	3.0	37 Navet		0.90
18 Céréales à petits grains		1.2	38 Banane	1.2	2.0
19- Sorgho		1.2	39 Riz		1.0
20- Vigne	1.5	3.0	40 Légumes	0.30	0.60

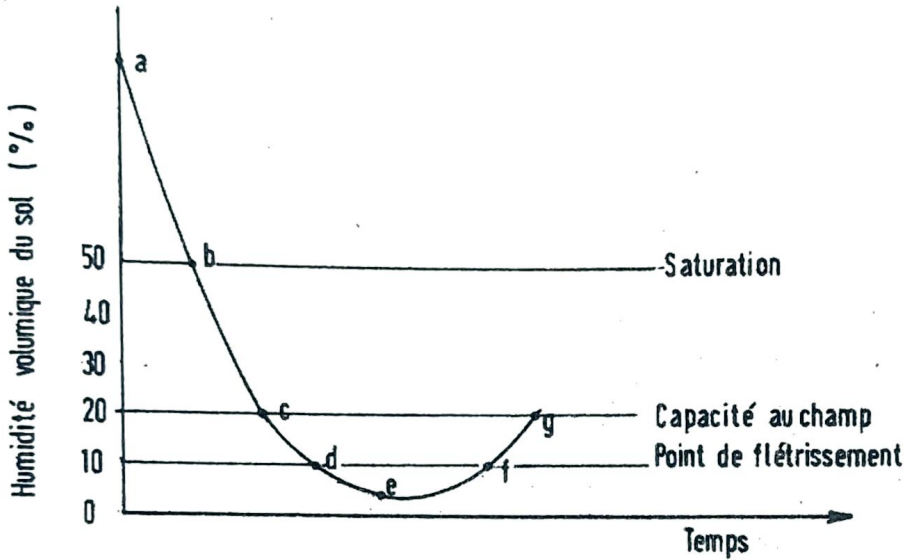


Fig. III-1 Relation entre la croissance des plantes et les conditions d'humidité d'un sol franc.  
 (a-b-c) hydrophytes; (c-d) mésophytes; (c-d-e-f-g) xerophytes; (e-f) état latent.

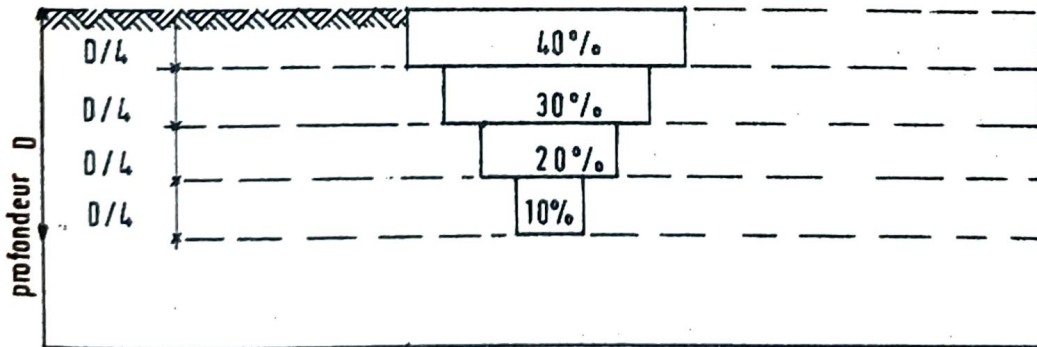


Fig.III.2 Patron d'extraction de l'eau, dans les sols homogènes, par les racines des plantes.

### 3.2.2 Taux de consommation d'eau pour la plante

#### 3.2.2.1 Evapotranspiration potentielle

##### 1- Généralités

Dans les conditions normales de l'humidité du sol, il existe deux flux d'eau dans le système "sol - plante - eau":

- 1o) Un flux direct du sol vers l'atmosphère, c'est l'évaporation physique.
- 2o) Un flux indirect du sol vers l'atmosphère à travers la plante, c'est l'évaporation physiologique ou transpiration.

L'intégration des deux flux donne l'évapotranspiration.

Le sol, les plantes, l'eau et l'atmosphère sont des composants d'un système physiquement unifié et dynamique où les différents phénomènes de flux qui s'y établissent sont interdépendants comme les maillons d'une chaîne (Gowan, 1965). Dans ce système le flux se produit à partir d'énergie potentielle plus élevée vers d'autre plus faible. Dans ce contexte, le concept de potentiel hydrique est également valable et applicable au système "sol - plante- eau". Le flux d'eau va dans la direction du gradient de potentiel négatif, c'est à dire, des points avec un potentiel relativement élevé (une quantité négative plus petite = faible tension) vers des points avec un potentiel hydrique relativement bas.

Les différences de potentiel en différentes parties du système "sol - plante - eau" sont proportionnelles à la résistance de flux. La résistance est généralement plus élevée dans le sol que dans la plante et encore plus élevée dans les feuilles que

dans l'atmosphère, d'où l'eau change son état de liquide à gazeux, en passant des feuilles à l'atmosphère par le processus de diffusion. La différence totale de potentiel entre le sol et l'atmosphère peut atteindre des centaines de bars et même 1 000 bars en climat aride.

Les facteurs qui conditionnent le taux d'évaporation peuvent être groupés en deux catégories bien distinctes suivant qu'ils sont propres à l'atmosphère ambiante ou à la surface évaporante elle-même.

- 1) Les paramètres caractérisant l'état de l'atmosphère au voisinage de la surface évaporante et son aptitude à provoquer l'évaporation, ces paramètres régissent le "pouvoir évaporant de l'atmosphère" ou Evapotranspiration potentielle.
- 2) Les paramètres caractérisant la nature et l'état de la surface évaporante ainsi que son aptitude à alimenter l'évaporation et à répondre plus ou moins rapidement aux variations du pouvoir évaporant de l'atmosphère.

La notion d'évapotranspiration potentielle est considérée par THORNTHWAITE comme la valeur maximale de l'évaporation si les ressources en eau mobilisables étaient au moins égales à celles qui peuvent être transformées en vapeur par le jeu des facteurs hydrométéorologiques et de la végétation. Cette définition se heurte à certaines difficultés d'interprétation, on considère plutôt, dans la pratique, l'ETP comme une référence et on la définit comme étant l'évapotranspiration d'un couvert végétal, bas, continu et homogène, dont l'alimentation en eau n'est pas limitante, et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique.

L'ETP ainsi définie correspond donc sensiblement à l'évapotranspiration d'une prairie ou d'un gazon en pleine croissance.

#### 3.2.2.2 Conclusion

On peut employer la notion d'ETP pour l'évaluation des besoins en eau d'irrigation, car pour une durée suffisante (pratiquement un mois) des recherches systématiques ont montré que:

- 1o) L'évapotranspiration d'une couverture végétale dense portée par un sol largement pourvu d'eau dépend essentiellement des facteurs météorologiques et varie assez peu avec la nature du sol et les espèces ou variétés végétales en cause.
- 2o) Dans ces conditions la quantité d'eau évaporée est très voisine de celle observée sur une nappe d'eau libre peu profonde placée dans le même site, c'est à dire à l'évapotranspiration potentielle telle que nous l'avons définie. Les écarts qui sont toujours inférieurs à 20% sont explicables par l'action des divers facteurs secondaires négligés par les formules et modèles usuels.
- 3o) Le rendement maximum des cultures est réalisé, toutes choses égales d'ailleurs, lorsqu'en permanence, leur approvisionnement en eau, assuré conjointement par:
  - Les précipitations,
  - Les réserves d'humidité du sol,
  - Et l'apport complémentaire de l'irrigation, est égal à l'évapotranspiration potentielle.

Cependant, si l'approvisionnement en eau est insuffisant, on n'observera qu'une évapotranspiration réduite que l'on pourra estimer en multipliant par un coefficient ad hoc l'ETP.

### 3.2.2.3 Estimation de l'ETP

Vu la complexité de la mise en oeuvre d'un dispositif de mesure de l'ETP, il est presque toujours préférable de recourir à des méthodes d'estimation. On dispose en effet actuellement de formules et de méthodes suffisamment variées, et adaptées à différents climats. De plus, une bonne estimation vaut mieux qu'une mauvaise mesure. Nous présentons deux parmi les formules les plus employées.

#### 3.2.2.3.1 Formule de THORNTHWAITE

Thorntwaite en 1948 développa une formule empirique basée sur de nombreuses expériences effectuées sur des cases lysimétriques pour estimer l'ETP. Elle s'exprime comme suit:

$$ETP = 16.0 \left( \frac{10T}{I} \right)^a$$

avec:

ETP = Evapotranspiration mensuelle en mm pour un mois fictif de 30 jours et une durée théorique d'ensoleillement de 12 heures sur 24.

T = Température moyenne mensuelle, en °C,

I = Indice thermique annuel (pour les 12 mois de l'année)

$$I = \sum i = \sum \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad \text{avec } i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 0,016I + 0.5$$

### 3.2.2.3.2 Formule de Penman dite "formule du bilan d'énergie"

Vers 1949, Penman proposait pour le calcul de l'évapotranspiration réelle d'une surface cultivée une formule générale qui s'écrit comme suit:

$$ETR = f.E_0 \quad 3.1$$

avec

$E_0$  = Evaporation à la surface libre en eau, elle s'exprime comme suit:

$$E_0 = \frac{\Delta RN + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad 3.2$$

avec

$\Delta$  = La pente de la courbe de tension de vapeur versus  $T^{\circ}C$ ,

$\gamma$  = Constante psychrométrique, elle varie peu avec la température et sa valeur moyenne est de 0,485 mm de Hg/ $^{\circ}C$

$E_a$  = Est le pouvoir évaporant de l'atmosphère en mm/jour, elle s'exprime comme suit:

$$E_a = 0.35(0,5 + 0,15U)(E_s - E_1) \quad 3.3$$

avec

$U$  = Vitesse du vent en m/s, mesurée à 2 m du sol

$E_s$  = Tension de vapeur saturante au point de rosée en mm de Hg fonction de la  $T^{\circ}\text{C}$

$E_i$  = Tension moyenne de vapeur d'eau dans l'air en mm de Hg.

$E_s - E_i$  = Déficit de saturation de l'air en mm de Hg

$R_N$  = Est l'énergie radiative c'est à dire la radiation solaire nette, elle s'exprime comme suit:

$$RN = \left[ (1 - a) RG - qGT^4 \right] \quad 3.4$$

avec

$a$  = Albedo, dans le cas de la surface d'eau, il est estimé à 0,05

$RG$  = Rayonnement solaire global au niveau du sol en  $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$ .

Pour calculer  $RG$ , la formule la plus couramment utilisée dans les régions tropicales est la formule de Glover et Mac Culloch:

$$RG = RGo (0.29 \cos \alpha + 0,52 \frac{h}{H}) \quad 3.5$$

avec:

$RGo$  = rayonnement solaire qui atteindrait le sol en absence d'atmosphère en  $\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$ . C'est une donnée astronomique indépendante du climat

$qGT^4$  Bilan radiatif de courte longueur d'onde en  $\text{mm}/\text{jour}$ .

avec:

$T$  = Température en  $^{\circ}\text{Kelvin}$



$G =$  Constante de Stephan =  $1.19 \cdot 10^{-7}$  cal/cm<sup>2</sup>/jour

$q = (0,56 - 0,092 \sqrt{Ei})(0.10 + 0.90 \frac{h}{H})$

$h =$  Durée d'insolation réelle mesurée en heures

$H =$  Durée d'insolation maximale théorique, c'est à dire, la durée du jour en heures

$E =$  Latitude du lieu.

La valeur obtenue pour le rayonnement net (RN) dans l'équation 3.4 est en calories/cm<sup>2</sup>/jour. Elle doit être convertie en mm d'évaporation (1 mm d'évaporation équivaut à 590 cal/cm<sup>2</sup>).

On aura donc, en mm/jour:

$$RN = \frac{1}{59} (1-a) RG - qGt^4 \quad 3.6$$

En remplaçant  $\Delta$ , RN, et  $E_a$  par les valeurs dans l'équation 3.2 on obtient  $E_o$  qui est l'évaporation calculée à la surface libre de l'eau.

$f =$  est un facteur empirique de conversion qui dépend de certaines caractéristiques des cultures (telles que indice foliaire, propriétés aérodynamiques, caractéristiques physiologiques de la saison, du climat et de l'aire cultivée.

Il est fondamental de souligner que l'ETP ainsi calculée et définie par Thornthwaite ou Pernman est une donnée climatique qui fait prédominer le pouvoir évaporant de l'atmosphère. Les facteurs cultureux n'interviennent pas ou interviennent peu dans les calculs.

Or le spécialiste en Irrigation sait que le taux d'humidité du sol n'est pas constant et l'aptitude des cultures à transpirer l'eau varie avec la phase de développement considérée. Dans ces conditions on est conduit à considérer une évapotranspiration réelle qui met en relief les caractéristiques culturales, les caractéristiques édaphiques et les niveaux d'humidité du sol.

#### 3.2.2.4 Evapotranspiration réelle (ETR)

C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles données: l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des contraintes d'ordre physique (succion du sol), chimique (concentration des solutions, biologique (régulation stomatique) et l'on a alors une réduction de la transpiration par rapport à la valeur maximale qu'elle pourrait atteindre en l'absence de contrainte. Ainsi, on peut exprimer ETR en fonction de ETP suivant la relation:

$$ETR = K ETP$$

3.7

Ainsi ETP inclue des aspects d'ordre climatique Tandis que K traduit l'effet physico-physiologique qui dérive des relations "sol - plante - eau".

En général, il est très difficile de suivre les variations des sols et des niveaux d'humidité, on considère  $K = K_c$ , ou  $K_c$  est

le coefficient cultural pour une période donnée. Beaucoup de chercheurs ont proposé des méthodes et formules pour estimer ETR, nous retenons les suivantes:

#### 3.2.2.4.1 Formule de Blaney et Criddle

La formule de Blaney et Criddle fut mise au point pour les conditions de l'ouest des Etats-Unis. Des relations furent établies entre les valeurs réelle de la consommation d'eau, la température moyenne mensuelle  $t$  et le rapport de la durée du jour pendant la période considérée à la durée du jours pour l'année entière.

ETR; pour une période donnée  $i$

S'écrit:

$$E \text{ TRI} = Kc_i f_i = (0,457 t_i + 8,13) P_i Kc_i \quad 3.8$$

Pour le cycle végétatif d'une culture de  $n$  périodes

$$\text{ETR} = \sum \text{ETRI} = \sum Kc_i (0,457 t_i + 8,13) P_i \quad 3.9$$

Parfois on fait:  $\text{ETR} = Kc \sum f_i = Kc \sum (0,457 t_i + 8,13) P_i$

avec:

$Kc_i$  = Coefficient de culture pour la période  $i$

$f_i$  = Est le facteur climatique de consommation pour la période  $i$

$Kc$  = Est le facteur moyen de culture pour le cycle végétal

$P_i$  = Rapport de la durée du jour pour la période  $i$  à la durée du jour pour l'année entière.

En 1965, Castilla Pérez (1965) a proposé un facteur de correction pour la formule de Blaney et Criddle que l'on exprime comme suit:

$$Kt_i = 0,24 + 0,0312 t_i$$

avec:

$t_i$  = Température moyenne pour la période  $i$

#### 3.2.2.4.2 Formule de HARGREAVES

En 1966, Hargreaves proposa une formule pour estimer ETR, elle s'exprime comme suit:

$$ETR = 17,37 KdT (1-0.01Hr)$$

avec:

$K$  = Coefficient empirique de culture en fonction du pourcentage de développement

$d$  = Coefficient mensuel de la durée du jour.  $d$  est exprimé en fonction de  $P$  de la formule de Blaney et Criddle,  $d = 0.12 P$

$T$  = Est la température moyenne mensuelle,  $n^{\circ}C$

$Hr$  = Est l'humidité relative moyenne à midi. Selon Al Barrak (1964)  $Hr = 1 + 0.4H + 0.004 H^2$

avec:  $H$  = Humidité relative moyenne sur 24 heures.

Etant donné que la formule de Hargreaves fut mise au point pour des conditions climatologiques moyennes, les résultats obtenus dans d'autres situations peuvent être améliorés en utilisant les coefficients de correction suivants:

- 1o) Facteur de correction de la vitesse du vent:  
Les résultats obtenus doivent être augmentés ou diminués de 9% pour chaque 50 km/jour d'augmentation ou de diminution par rapport à 100 km/jour qui correspond aux conditions d'établissement de la formule
- 2o) Facteur de correction pour la durée d'éclairement:  
La formule fut obtenue pour une insolation de 90%.  
Pour des conditions différentes, on doit apporter les corrections suivantes:

Insolation	Correction
%	%
30	-34
40	-28
50	-24
60	-20
70	-16
80	- 9
90	0

- 3o) Facteur de correction pour l'altitude  
Les résultats doivent être variés de 1% pour chaque variation de 100 m à partir de la côte 150 m qui correspond aux conditions d'établissement de la formule.

### 3.2.3 Remarques et conclusions sur les formules

Pruitt (1960, 1962, 1964), Stephens et Stewart (1963) et Eagleman (1967) en adoptant comme critères le bilan hydrique au niveau d'une zone et les besoins en eau des cultures pour des périodes allant de deux semaines à un mois ont évalué les formules de Penman, Thornthwaite, Blaney et Criddle; les remarques et conclusions qui ont été faites sont les suivantes:

#### 3.2.3.1 Formule de Penman

La formule de Penman est l'une de celles qui donnent les meilleures approximations de l'ETP, elle est aussi celle qui reproduit le plus fidèlement les variations saisonnières de cette donnée.

Cependant le grand nombre de données climatiques nécessaires pour la calculer en limite l'emploi aux stations météorologiques de première catégorie.

#### 3.2.3.2 Formule Thornthwaite

La formule de Thornthwaite, en général donne des valeurs inférieures à celles observées. Cette formule ne fonctionne pas dans des conditions d'aridité et de semi aridité, car elle fut mise au point à partir des données de la zone humide des Etats-Unis.

#### 3.2.3.3 Formule de Blaney et Criddle

Cette formule a tendance à sous estimer les ETP quand les besoins sont supérieurs à 5 mm/jour et les surestimer quand les valeurs sont inférieures à 5 mm/jour.

Cependant cette formule présente par rapport aux autres l'avanta-

ge d'avoir été développée à partir des expériences sous irrigation, en conditions d'aridité et de semi-aridité.

D'autre part, cette formule intègre les facteurs culturaux dans un coefficient individuel  $K_0$ , fonction de chaque culture et de sa phase de croissance.

L'emploi de cette formule sera réservé aux cas où l'on ne dispose d'aucune estimation des paramètres climatiques autres que la température.

#### 3.2.3.4 Formule de Hargreaves

Elle présente tous les avantages de la formule de Blaney et Criddle et est adoptée par beaucoup de chercheurs de l'Amérique Centrale et des Caraïbes

#### 3.2.4. Relation entre la production et l'évapotranspiration

Le développement d'une plante annuelle passe généralement par plusieurs phases parmi lesquelles on retrouve toujours plus ou moins:

- Une phase initiale (semis ou plantation)
- Une phase d'installation avec développement du système racinaire et formation de l'appareil végétatif
- Une phase de croissance active pendant laquelle l'activité photosynthétique est maximale.
- Une phase de migration des réserves suivie éventuellement d'une phase de maturation.

Une bonne alimentation en eau pendant les deux premières phases est le plus souvent impérative pour l'installation de la culture; mais cette période est généralement brève, et l'évapotranspiration relativement faible, si bien qu'il est facile de réunir les conditions hydriques d'une bonne installation (en fait, il s'agit plus de maintenir le sol à un certain niveau d'humidité, que de compenser la consommation en eau de la plante)

### 3.2.5.1 Les périodes critiques

Après que la culture ait été bien installée, tous les efforts doivent être convergés vers un rendement optimum; or on a constaté que la majorité des plantes cultivées ont des périodes où la satisfaction des besoins en eau est déterminante pour l'obtention d'un rendement adéquat: ce sont les périodes critiques.

Sans que l'on puisse l'énoncer comme une règle stricte, on observe en général:

- 1o) Que pour les plantes dont on récolte le fruit (maraîchage, banane, agrumes) ou la graine (céréales, maïs), la période de floraison est critique.
- 2o) Que cette période critique est suivie d'une autre plus ou moins sévère (nouaison, grossissement du fruit ou du grain. Ceci ne signifie pas que pendant la période critique les besoins en eau soient plus élevés, mais seulement que l'effet d'un rationnement en eau a des conséquences, sur le rendement plus graves et généralement irréversibles. A titre indicatif, on présente au tableau III-2, les périodes critiques pour différentes cultures.



### 3.5.2.5.2 Réponse des cultures à différents niveaux d'humidité du sol

Bien que Veihmeyer et Hendrickson (1950) prétendaient que la disponibilité de l'eau du sol pour les plantes est uniforme entre la capacité de rétention au champ et le point de flétrissement permanent, la vérité est nettement différente: "à mesure que le sol se dessèche les plantes ont beaucoup plus de difficultés pour extraire l'eau". Il arrive même un moment où la vitesse d'extraction est inférieure à la transpiration, il se produit alors une altération du métabolisme de la plante. Si l'état de déficit persiste, non seulement le rendement est réduit, mais la plante peut mourir par déshydratation. Les recherches effectuées au cours de ces dernières années ont démontré que ce processus affecte presque toutes les cultures.

Downey en 1972 a compilé les résultats des investigations effectuées par 14 chercheurs sur huit cultures différentes. Le rendement est exprimée en grain. Il est arrivé aux conclusions suivantes:

- a) Le rendement des cultures n'est pas une simple fonction de l'évapotranspiration totale, mais dépend plutôt des tensions auxquelles la plante a été soumise à une ou des périodes critiques de sa croissance.
- b) D'une façon générale, une forte tension de l'eau du sol au moment de la floraison et de la maturation ont des effets significativement négatifs sur le rendement.

Au cours des recherches effectuées au Collège de Post-gradués de Chapingo, Mexique (Mojarro, 1977) sur le haricot, on trouva les résultats suivants:

- Soumis à la sécheresse au cours de quatre étapes différentes de son développement, la réduction du rendement quand le traitement intervient à la floraison fut de 65% par rapport au témoin; par contre si les stress de même magnitude est appliqué durant la période de développement végétatif, la réduction du rendement est seulement de 24% par rapport au témoin.
- Deux traitements (sécheresse) consécutifs, durant la floraison et la maturation du grain provoquent des réductions du rendement de 74%

### 3.2.5.3 Conclusions

Les exemples précédents confirment la théorie de que le rendement (en fruit) des cultures dépend, en grande partie, des variations du niveau d'humidité du sol.

Des recherches doivent être effectuées au niveau des systèmes et districts d'irrigation pour détecter la sensibilité des cultures (au déficit d'humidité du sol à des étapes bien précises. Si se présente une carence en eau au niveau de l'alimentation, les arrosages doivent être programmés de telle sorte que, dans les périodes critiques, la culture reçoit au moins une application d'eau. Dans le cas du haricot, lequel est très sensible au manque d'eau au début de la floraison, on doit s'évertuer à apporter l'eau quand on observe l'apparition des premières ébauches florales.

Tableau III-2 Périodes critiques pour différentes cultures du point de vue de la demande d'eau.

Luzerne	juste après la coupe pour la production de fourrage sec, et au début de la floraison pour la production de semences
Abricotier	période de la floraison et du développement des bourgeons
Orge	début de la montaison > stade pâteux > début du tallage ou de la phase de maturation
Haricot	floraison et période de formation des cosses > un peu plus tôt > période de maturation. Cependant, période de maturation plus tôt si la culture n'a pas manqué d'eau auparavant
Broccoli	pendant la pomaison et le renflement des pommes
Chou	pendant la pomaison et le renflement des pommes
Graines de ricin	demande un sol relativement très humide pendant toute la période de croissance
Chou-fleur	demande des arrosages fréquents depuis la plantation jusqu'à la récolte
Cerisier	période de croissance rapide du fruit avant la maturation
Agrumes	floraison et nouaison; on peut provoquer une forte floraison en retenant l'irrigation juste avant la floraison (citron); on peut empêcher la "chute de juin" des fruits plus faibles par une forte teneur en eau du sol
Coton	floraison et moment de la formation des capsules > début de la croissance > après la formation des capsules

Arachides	floraison et développement des semences > entre la germination et la floraison et fin de campagne végétative
Laitue	demande un sol humide, notamment avant la récolte
Mais	période de pollinisation, depuis la formation des panicules jusqu'au stade des graines laiteux > avant la formation des panicules > période de remplissage des grains; la période de pollinisation est très critique s'il n'y a pas eu d'eau auparavant
Avoine	début de l'apparition des épis, éventuellement jusqu'à l'épiaison
Olivier	juste avant la floraison et pendant le gonflement des fruits
Pêcher	période de croissance rapide du fruit avant maturité
Pois	au début de la floraison et au moment du gonflement des cosses
Pomme de terre	forte teneur en eau du sol; après la tubérisation, de la floraison à la récolte
Radis	pendant la période de grossissement de la racine
Tournesol	éventuellement au moment du semis et de la floraison & stade de développement des semences
Petites céréales	de la montaison à l'épiaison
Sorgho	enracinement secondaire et tallage jusqu'à la montaison > épiaison, floraison et formation du grain > remplissage du grain
Fèves de soja	floraison et nouaison, et éventuellement période de croissance végétative maximum
Fraisier	développement du fruit jusqu'à maturation
Betterave sucrière	trois à quatre semaines après la levée

## CHAPITRE IV

## LES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION AU NIVEAU DES PROJETS ET AU NIVEAU DU CHAMPS

## Résumé

Dans un système d'irrigation, il est vital avant chaque cycle agricole de prévoir la quantité d'eau que l'utilisateur va réclamer et déterminer dans quelle mesure les besoins pourront être satisfaits. Cette approche doit permettre au planificateur d'optimiser l'utilisation des ressources hydriques.

## Objectifs:

Après avoir complété ce chapitre, le participant sera capable de:

- 1) Déterminer la pluie efficace au niveau d'un périmètre irrigué
- 2) Estimer les besoins nets et bruts en eau d'irrigation.
- 3) Estimer les hauteurs et les fréquences d'irrigation au niveau de la parcelle.
- 4) Faire un exemple de balance hydrique et de programmation de l'irrigation

## Eléments de base à retenir

- Le calcul des besoins en eau d'irrigation est essentiel pour l'opération optimale d'un système d'irrigation
- Des calculs précis éviteront des problèmes de carence et des conflits opérationnels.
- Les calculs précis permettront d'améliorer l'efficacité de

conduction et de distribution

- Le calcul de la dose d'arrosage et des fréquences d'arrosage permettent une bonne gestion de l'eau au niveau de la parcelle.
- Quand la hauteur précise d'eau est appliquée, on augmente l'efficacité d'application de l'eau d'irrigation.
- Quand les fréquences d'irrigation sont rationnellement calculées, les rendements sont améliorés.

#### 4.1 Généralités

La planification et la programmation de l'irrigation au niveau des projets et au niveau du champ ont pour finalité:

- a) La détermination des besoins en eau d'irrigation pour compenser les déficits d'eau du sol pendant la saison de croissance des cultures;
- b) La détermination des fréquences avec lesquelles la réserve en eau utile du sol doit être reconstituée pour satisfaire les dits besoins dans des conditions idéales.

En effet, pour assurer l'opération économique optimale d'un système d'irrigation, on doit appliquer la quantité requise d'eau là où il le faut et quand il le faut. Généralement, les excès d'eau se perdent par percolation profonde et ne sont d'aucune utilité pour les cultures. Par contre, si les doses d'irrigation sont insuffisantes pour ramener le sol au potentiel hydrique adéquat, les rendements des cultures seront affectés négativement.

De même, l'intervalle de temps considéré entre deux apports d'eau d'irrigation est un facteur déterminant du rendement des cultures

Si on attend que toute la réserve d'eau utile du sol soit épuisée avant de faire un apport, la plante peut se faner de façon passagère avec des conséquences néfastes pour la production. D'un autre côté, des applications fréquentes d'eau peuvent se révéler non pratiques et réduire l'efficacité économique du système car elles mobilisent une main d'oeuvre considérable surtout dans le cas de l'irrigation gravitaire.

Par conséquent, le responsable d'un projet d'irrigation ou le gestionnaire d'un réseau irrigué doit pouvoir répondre de façon précise à deux questions:

- 1o) Quelles quantités d'eau faut-il apporter aux cultures?
- 2o) Quand faut-il les apporter?

#### 4.2

Quelles quantités d'eau faut-il apporter aux plantes?

4.2.1 Le concept en eau d'irrigation au niveau du champ représentent le volume et la fréquence des applications d'eau nécessaires pour compenser les déficits en eau du sol pendant la période végétative d'une culture. Ces besoins sont déterminés par l'évapotranspiration de la culture, déduction faite de l'eau fournie par les précipitations et autres sources (l'eau souterraine, les débits entrants superficiels ou souterrains, etc...).

Ramenés à la totalité de la superficie cultivée, les besoins en eau servent à calculer les volumes et les débits nécessaires et à déterminer si les ressources hydriques disponibles sont suffisantes.

Selon les données dont on dispose et la précision requise, on peut estimer les besoins pour des périodes saisonnières, mensuelles ou décadales. Le pas de temps choisi pour établir les

besoins a une importance capitale; des périodes trop longues peuvent masquer des pénuries d'eau de courte durée. Des périodes trop courtes sont peu pratiques pour la gestion du système et ne sont pas économiques.

Comme l'irrigation n'est jamais efficiente à cent pour cent, il faut prévoir une certaine marge en raison des pertes évitables et inévitables y compris les percolations profondes, le ruissellement superficiel et autres erreurs de gestion ou de technique.

L'efficacité d'application des irrigations  $E_a$ , s'exprime normalement en fraction ou pourcentage des besoins nets, c'est à dire, que les besoins bruts en eau d'irrigation au niveau du champ peuvent s'exprimer comme suit:

$$BB = \frac{BN}{E_a} \quad 4.1$$

avec

BB = Besoins bruts exprimés, en mm

BN = Besoins nets exprimés, en mm

$E_a$  = Efficience d'application, (inférieur à 1)

Pour l'exploitation des projets, les besoins en eau se concrétisent sous la forme d'un programme en hauteur d'eau et intervalles entre les irrigations.

#### 4.2.2 Méthode de calcul des besoins en eau

Quand on calcule les besoins en eau d'irrigation au niveau du champ pour une culture ou un système agronomique déterminé, en vue de



la planification globale de l'irrigation, on doit procéder comme suit:

- a) Pour différentes cultures, différentes rotations et intensités des cultures, déterminer les variables composant le bilan hydrique du champ; ce sont:
- L'évapotranspiration réelle de la culture: ETR
  - La précipitation efficace : Pe
  - Le taux d'humidité du sol en début de période HS

Les autres variables sont difficilement mesurables.

- b) A partir du bilan hydrique du champ, déterminer les besoins nets saisonniers et mensuels, en eau d'irrigation BN.
- c) Pour le mois où les besoins nets en eau d'irrigation atteignent leur maximum, déterminer les besoins nets de la période de pointe BN (Pointe)
- d) Après avoir choisi l'efficacité d'application des irrigations au niveau du champ, déterminer les besoins bruts en eau d'irrigation au niveau du champ BB.
- e) Déterminer si nécessaire, les quantités d'eau pour le lessivage des sels et autres

#### 4.2.3 Détermination des variables du bilan hydrique

##### 4.2.3.1 Evapotranspiration réelle (ETR)

On peut déterminer l'évapotranspiration réelle d'une culture (ETR) en utilisant l'une des méthodes de prévision décrites au chapitre III.

#### 4.2.3.2 Précipitations efficaces (Pe)

Olivier (1963) définit les pluies efficaces comme la partie des pluies qui est emmagasinée dans la zone des racines des plantes. Les pluies efficaces dépendent des facteurs tels que:

- a) L'intensité des précipitations;
- b) La permabilité du sol;
- c) Le contenu d'humidité du sol;
- d) La couverture végétale du sol;
- e) Les hauteurs de précipitations;
- f) La topographie.

En général, on ne dispose pas de toutes ces données et l'on se contente d'estimer les pluies efficaces à partir des pluies tombées.

On projette les précipitations futures en analysant statistiquement le relevé des pluies passées, Une valeur pratique et réaliste fiable fréquemment utilisée est la hauteur moyenne mensuelle des précipitations qui se produit, (à titre de probabilité) trois années sur quatre, cela suppose néanmoins une certaine pénurie une fois tous les quatre ans. Il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer la distribution de fréquence des pluies, la plupart des manuels d'hydrologie les décrivent en détail ( voir particulièrement Ven Te Chow, Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, 1964)

Pour l'estimation des pluies efficaces, il existe plusieurs procédés dont les plus simples sont les suivants:

- 1- Méthode du Service de Conservation des sols de l'USDA

Doorenbos et Pruitt (1975) présentent un tableau qui permet d'estimer les pluies efficaces en fonction des précipitations moyennes mensuelles observées et de l'évapotranspiration réelle ETR d'une culture ou d'un système de cultures. La capacité de rétention d'eau du sol  $S$  est supposée égale à 75 mm au moment de l'irrigation dans le cas contraire, le même tableau présente des facteurs de correction.

## 2- Méthode de Ogrosky (Ven Te Chow, 1964)

Ces chercheurs proposent une méthode pour estimer les pluies efficaces selon laquelle le coefficient d'efficacité des précipitations ( $C_e$ ) s'exprime comme suit:

$$C_e = \frac{ETR}{1.53 P + 0.8 ETR} \quad 4.2$$

Par conséquent:

$$P_e = C_e P \quad 4.3$$

avec:

- $C_e$  = Coefficient d'efficacité
- $P_e$  = Pluies efficaces
- $P$  + Précipitations observées.

3- Méthode de l'US. Bureau of reclamation ou méthode de Blaney et Criddle (1962)

Cette méthode utilisée pour les régions arides et semi-arides constitue un guide approximatif pour estimer les pluies efficaces. Elle se base sur les précipitations saisonnières mensuelles des années consécutives les plus sèches, tandis que les accroissements de précipitations mensuelles ont une efficacité qui va de 90% pour les premiers 25 mm à 0% au-delà de 150 mm.

4.2.3.3 Taux d'humidité du sol (HS)

Pour les besoins de l'irrigation HS est assimilé à l'humidité du sol au début de la période de calcul. Sa valeur peut être mesurée ou calculée.

4.2.4 Calcul des besoins nets en eau d'irrigation BN

Lorsqu'on établit les besoins périodiques en eau d'irrigation pour une culture ou un plan de culture donnés, il faut tenir compte de façon préférentielle de trois variables (ETR, Pe et HS). La relation qui existe entre les besoins nets BN et ces variables peut être exprimée comme suit:

$$BN = Pe + HS - ETR$$

4.4

Toutes les variables sont déjà définies, les valeurs négatives de BN pour une période traduisent des déficits, tandis que des valeurs positives indiquent des excédents qui alimenteront HS pour la prochaine période.

En général, on considère le besoin net de pointe BN (pointe) comme le besoin net mensuel le plus élevé.

## 4.2.5

Besoins bruts en eau d'irrigation. BB

Le besoin brut en eau d'irrigation au niveau du champ est en relation directe avec l'efficacité de l'irrigation au niveau considéré (champ, distribution, conduction). L'efficacité d'application (Ea) par exemple représente la fraction de l'eau d'irrigation appliquée qui est emmagasinée par le sol et disponible pour la culture. Les efficacités seront faibles quand la hauteur d'eau appliquée dépasse le volume qui peut être emmagasiné dans la zone racinaire au moment de l'irrigation, l'excédent d'eau étant perdu par drainage en profondeur. Quand le taux d'infiltration du sol, il se produit un ruissellement appréciable et des pertes au bas champ.

En général, la demande brute en eau d'irrigation à un niveau quelconque peut être exprimée comme suit:

$$BB = \frac{BN}{X} \quad 4.5$$

En fonction du niveau considéré, X peut représenter Ea (efficacité d'application), Ed (efficacité de distribution), Ep (efficacité du système).

## 4.2.6.

Besoins en eau de lessivage

Il est de toute importance de considérer les besoins en eau de lessivage pour éliminer les sels accumulés dans le profil racinaire.

Les besoins de lessivage LR ou fraction de l'eau d'irrigation qui doit traverser la zone racinaire active pour maintenir la salinité à un niveau déterminé peuvent être calculés comme suit:

$$LR = \frac{CE_e}{(5 CE_s - CE_e)} \quad 4.6$$

avec

$CE_e$  = Conductivité électrique de l'eau d'irrigation en mm hos/cm

$CE_s$  = Conductivité électrique de l'extrait de saturation du sol en mm hos/cm

Pour les besoins de planification préliminaire, on peut calculer la demande brute en eau d'irrigation y compris les besoins de lessivage comme suit:

$$BB = \frac{BN}{1 - LR} \times \frac{1}{Ea} \quad 4.7$$

### 4.3 Quand faut-il irriguer?

#### 4.3.1 Le concept de la programmation de l'irrigation.

Après avoir déterminé les quantités d'eau nécessaires pour compenser les déficits (voir section 4.1) des plantes, il est fondamental que l'on ait un programme d'apport de l'eau. Autrement dit, le planificateur doit pouvoir estimer la hauteur d'eau que l'on appliquera à chaque arrosage et la fréquence y relative; il préparera ainsi son programme d'irrigation.

Le programme d'irrigation varie avec la culture, le sol, le climat, la nature du produit récolté et le degré d'aménagement

#### 4.3.2 Hauteur d'irrigation

La hauteur d'irrigation ou dose d'arrosage est la quantité d'eau administrée au sol, nécessaire et suffisante pour le ramener à la capacité au champ. sur toute la profondeur radriculaire, Il faut recueillir sur place les données concernant le type de sol et sa capacité d'emmagasinement d'eau utile. On peut estimer approximativement l'eau utile du sol en utilisant les figures et et tableau du chapitre II. Il convient de noter que pour chaque culture, il existe une force de succion maximum au-delà de laquelle les plantes ne peuvent plus s'alimenter en eau convenablement. Beaucoup de théories ont été développées sur les niveaux d'humidité optimale pour déclencher l'irrigation.

##### 4.3.2.1 Niveaux d'humidité pour déclencher l'irrigation

La finalité de l'irrigation est l'élimination des risques de manque d'eau au moment des périodes critiques dans la vie des plantes. Cet objectif est atteint en apportant de l'eau aux

plantes chaque fois que la tension atteint une certaine valeur. Le niveau idéal n'a pas été déterminé quantitativement pour chaque culture. Certaines cultures exigent des niveaux d'humidité assez élevés, d'autres non.

Pour les besoins du cours, nous adoptons le critère proposé par Dale R. Shookley pour fixer les niveaux d'humidité approximatifs pour déclencher les arrosages. Cette approche se base sur le patron d'extraction de l'eau du sol. Elle part du fait que la plante peut puiser au grand maximum 40% de ses besoins dans le premier quart supérieur de la zone des racines. Par exemple, si la plante exploite les cent pour cent de l'eau utile du premier quart, on peut considérer qu'elle a exploité environ 62,5 % de l'eau utile totale retenue dans les quatre quarts. Il existe une relation simple entre l'eau consommée dans le premier quart et celle extraite dans le profil racinaire, elle s'exprime comme suit:

$$F = 0.625 C_s \quad 4.8$$

avec

$F$  = Fraction volumique d'eau utile extraite dans le profil racinaire.

$C_s$  = Fraction de l'eau utile extraite dans le premier quart (par rapport au contenu du premier quart)

Ainsi en contrôlant le niveau d'humidité du premier quart, on peut estimer le moment opportun pour déclencher l'irrigation.

Dans les zones arides, on suggère d'irriguer quand  $C_s = 0,8$ , ce qui correspond à une teneur en eau utile de 50%.

Dans les zones humides, on peut aller jusqu'à  $C_s = 0,95$ , soit une teneur en eau utile de 40%

Dans certains cas on tient compte de la résistance des plantes à



la sécheresse pour proposer les valeurs de  $C_s$ . Par exemple pour les cultures sensibles à la sécheresse, on doit irriguer pour des  $C_s \leq 0,65$ , pour les cultures moyennes, on doit rétablir la réserve utile pour  $0,65 < C_s < 0,75$  et dans le cas des cultures résistantes pour  $0,75 < C_s < 0,90$ .

#### 4.3.2.2. Hauteur pratique d'arrosage. (Dose pratique)

Pratiquement, on n'attend pas que toute l'eau utile du sol soit épuisée pour déclencher l'irrigation, la dose à appliquer est fonction de  $C_s$  et elle doit être inférieure aux 2/3 de la réserve totale utile du sol. La hauteur pratique s'exprime comme suit:

$$h = 0.625 C_s (RU)d. = Fd(RU) \quad 4.9$$

avec:

$h$  = Hauteur d'eau à appliquer, en mm

$d$  = Profondeur radriculaire, en mm

$RU$  = Réserve utile du sol en fraction volumique

#### 4.3.3 Fréquence et Intervalles d'irrigation

La repartition correcte des arrosages dans le temps et leur régularité ont autant d'importance que la quantité d'eau appliquée au champ pendant la campagne. Des irrigations fréquentes, même si le volume total est correctement appliqué, réduisent l'efficacité économique du système (frais de fonctionnement élevés). De même, un retard dans les applications, notamment au moment des périodes critiques peut avoir des répercussions considérables sur les rendements agricoles.

On peut établir une première approximation de l'espacement des arrosages comme suit:

$$I = \frac{h}{BN} \quad 4.10$$

avec:

I = Intervalle entre deux arrosages en jours

h = Dose d'arrosage, en mm

BN = Besoins nets d'irrigation, en mm/jour

La fréquence des arrosages est estimée à partir de la relation:

$$Na = \frac{BN}{h} \quad 4.11$$

avec:

Na = Nombre d'irrigations au cours d'une période

BN = Besoins nets périodiques, en mm

h = Dose d'arrosage en mm.

## CHAPITRE V

## ALIMENTATION EN EAU D'IRRIGATION

## Résumé

Pour programmer la distribution de l'eau au niveau des parcelles il faut connaître les débits à dériver au niveau des ouvrages de captage, les débits à fournir à la parcelle pour satisfaire les besoins sans pour autant que l'utilisateur soit débordé.

## Objectifs

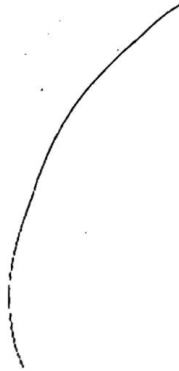
A la fin de ce chapitre, le participant pourra :

- Calculer les débits fictifs continus périodiques au niveau des projets
- Calculer les débits totaux nécessaires au niveau d'un périmètre.
- Déterminer la superficie qu'on peut programmer pour l'irrigation en fonction des besoins et des disponibilités.
- Déterminer la main d'eau au module d'irrigation
- Etablir un horaire d'arrosage.

## Éléments de base à retenir

- Le calcul des débits disponibles et des débits nécessaires permettent de dimensionner de façon optimale les ouvrages et de programmer pour l'irrigation les surfaces optimales.
- La main d'eau (module d'irrigation) est la quantité d'eau qu'un usager seul peut maîtriser sans difficulté, c'est la pierre angulaire de la distribution d'eau au niveau de la parcelle.

- La main d'eau; la perméabilité du sol et la dose d'arrosage fixent les dimensions de la parcelle unitaire.



## 5.1 Généralités

Après avoir déterminé les besoins en eau d'irrigation, les doses d'arrosage, les fréquences et intervalles d'application; le planificateur doit se tourner vers la conception et/ou la gestion du système d'irrigation. En effet, il doit déterminer les quantités d'eau à dériver dans le temps au niveau des ouvrages de tête pour satisfaire les besoins des cultures sur les périmètres dominés, les besoins sont alors exprimés en litres/seconde/hectare (l.p.s. ha) et en litres/secondes (l.p.s.).

A partir de ces données, le planificateur saura si les ressources hydriques disponibles sont suffisantes pour satisfaire les besoins il pourra également dimensionner les ouvrages de conduction de façon à répondre dans des conditions optimales aux besoins des cultures.

Les concepts qu'il faut maîtriser à ce niveau sont les suivants:

### a- Le débit (Q)

Le paramètre temps permet de passer des volumes et des hauteurs d'eau définissant les besoins aux débits définissant les ouvrages. Le débit c'est la quantité d'eau fournie par unité de temps, il s'exprime en l.p.s. ou en  $m^3/s$ .

### b- Le débit fictif continu (QF)

C'est le débit qui fourni d'une façon ininterrompu 24 heures sur 24, permettrait de satisfaire les besoins d'une

période donnée pour la surface unitaire. Il est exprimé en l/s/ha.

c- Le débit caractéristique (QC)

Parmi les débits fictifs continus périodiques, le débit maximal au moment de la période sèche (période de pointe) s'appelle le débit caractéristique.

d- Le débit réel (QR)

En réalité la distribution par débit continu est, mis à part quelques cas particuliers (rizières), difficiles à mettre en application. Aussi, la distribution de la dose d'arrosage ne se fait pas de façon continue, mais selon un débit  $QR > QF$  qui dépend de la nature du sol, de la topographie du terrain et de l'habileté de l'usager.

e- Le module (QM)

C'est le débit qu'on applique effectivement à l'unité parcellaire d'arrosage pendant le temps nécessaire pour que la parcelle reçoive dans de bonnes conditions la dose dont elle a besoin. Sa limite supérieure est la "Main d'eau", c'est à dire le débit qu'un homme peut "manier" sans être débordé. Les valeurs de la "main d'eau" varient couramment de 10 à 50 l/s. Une valeur couramment adoptée est 20 l.p.s.

Estimation préliminaire des débits d'irrigation au niveau des projets.

Quand on calcule l'alimentation en eau d'irrigation d'un projet pour la durée de la campagne et pour les périodes de pointe, on doit adopter la démarche suivante:

- 1- Déterminer le calendrier cultural (Plan et intensité des cultures) et la superficie du projet.
- 2- Estimer les besoins en eau
- 3- Estimer les débits fictifs continus périodiques et les volumes annuels nécessaires pour satisfaire les besoins.
- 4- Estimer l'efficacité du projet.
- 5- Faire des commentaires sur les disponibilités en eau et les besoins

#### 5.2.1 Calendrier cultural et superficie du projet

Pour un projet donné, le calendrier cultural dépend du type de projet, de la tenure des terres et de tous les aspects sociaux, financiers et économiques caractérisant la situation de la zone. Dans certains cas, on propose des calendriers, parfois on est obligé de se plier aux traditions qui prévalent chez les locaux. Le calendrier cultural est un outil de toute première importance qui permet d'estimer de façon plus rationnelle les besoins en eau d'irrigation.

Le calendrier cultural fournit des informations sur la superficie occupée par chaque culture et leur distribution dans le temps.

#### 5.2.2 Besoins en eau

Pour les calculs (voir section 4.2.4)

#### 5.2.3. Débits fictifs continus et volumes.

En général, il importe au concepteur de déterminer les débits fictifs continus périodiques (mensuels) de façon à dimension-

ner les ouvrages. Il doit veiller à ce que ses aménagements soient à même de transiter le débit caractéristique pour la superficie projetée. En général, les débits fictifs continus sont calculés suivant la relation:

$$QF_i = \frac{2,78 (BN_i)}{24 n_i} \quad 4.12$$

avec:

$QF_i$  = Débit fictif continu pour le mois  $i$  en litres par seconde par hectare,  $i = 1, 2, 3, \dots, 12$ .

$BN_i$  = Besoins nets pour mois  $i$ , en mm.

$n_i$  = Nombre de jours du mois  $i$

Pour calculer le débit net total " $QN_i$ " à fournir pour le mois  $i$ , on utilise la relation

$$QN_i = QF_i S_i \quad 4.13$$

avec

$QN_i$  = Débit nécessaire pour le mois  $i$ , en l.p.s.

$S_i$  = Superficie emblavée au cours du mois  $i$ , en Ha.

Pour estimer les volumes annuels nets d'eau nécessaires, on utilise la relation suivante:

$$V = \sum VN_i \quad 4.14$$

avec

$V$  = Volumes annuels nets d'eau en  $m^3$

$VN_i$  = Volumes nets d'eau pour le mois  $i$ , en  $m^3$



où:

$$VNi = 86,4 \text{ ni } QNi$$

4.15

Toutes les variables ont été déjà définies.

#### 5.2 4. Efficacité du projet

Pour évaluer quantitativement les volumes réels d'eau nécessaires pour répondre aux besoins en eau d'irrigation, il faut déterminer l'efficacité avec laquelle le réseau distribuera l'eau de l'ouvrage de dérivation à la parcelle et celle avec laquelle l'utilisateur appliquera l'eau. L'efficacité du projet peut s'exprimer comme suit:

$$E_p = E_c \times E_b \times E_a \quad 4.16$$

avec

- $E_p$  = Efficacité du projet
- $E_c$  = Efficacité de conduction de l'eau depuis les ouvrages de captage jusqu'à l'entrée d'un ensemble de parcelles
- $E_b$  = Efficacité des canaux d'irrigation depuis le canal d'amenée (canal principal) jusqu'à la prise d'eau au niveau du champ.
- $E_a$  = Efficacité de l'application de l'eau au niveau de la parcelle, c'est à dire. de l'entrée de la parcelle à la zone des racines.

Ces efficacités permettent de calculer les débits bruts périodiques  $QBi$  et les volumes bruts périodiques  $VBi$ . De même, on peut déduire les débits fictifs continus bruts.

### 5.2.5 Commentaires sur les disponibilités et les besoins en eaux

Dans le cadre des projets d'irrigation par dérivation, on est obligé de programmer l'irrigation à partir de l'écoulement minimum. Ceci donne lieu à des situations de disette en pleine abondance. En effet, on observe des cas où les écoulements annuels sont nettement supérieurs aux besoins annuels (volume annuel); cependant, en raison de la mauvaise distribution des disponibilités, les superficies irriguées par dérivation ne représentent qu'une portion infime de la surface totale; on suggère alors la possibilité de construction de barrages de retenue.

### 5.3 Estimation des modules d'irrigation au niveau de la parcelle.

Le débit nécessaire (débit réel QR ou module), pour satisfaire les besoins d'une parcelle de superficie donnée, est principalement déterminé par la hauteur d'eau nécessaire pour reconstituer la réserve d'eau du sol dans la zone radriculaire, le taux auquel l'eau peut être appliquée (fonction de la perméabilité du sol, l'habileté de l'usager et la méthode d'irrigation.

Ainsi, quand on calcule l'alimentation en eau d'irrigation au niveau de la parcelle, on doit adopter la démarche suivante:

- 1- Déterminer la hauteur d'irrigation ou dose d'arrosage (h) en mm.
- 2- Calculer le temps pratique d'arrosage,  $t_p$
- 3- Déterminer l'espacement entre deux irrigations, I
- 4- Déterminer le débit Q nécessaire pour satisfaire les besoins d'arrosage sur la surface S d'un bloc d'irrigation pour un temps maximum I.
- 5- Déterminer la surface optimale d'arrosage A par usager
- 6- Diviser le débit Q en "mains d'eau" ou modules QM.

### 5.3.1 Calcul de h

La hauteur ou dose d'arrosage est déterminée par la relation:

$$h = 0,625 C_s (RU)d \quad 4.19$$

Toutes les variables ont été définies.

### 5.3.2. Calcul du temps pratique d'arrosage, $t_p$

Le temps d'arrosage est étroitement lié à h et à la vitesse d'infiltration basique du sol. Il se calcule comme suit:

$$t_p = \frac{h}{2I_b} = \frac{h}{I_m} \quad 4.20$$

avec:

$I_b$  = Vitesse d'infiltration basique, en mm/heure

$I_m$  = Vitesse d'infiltration moyenne, en mm/heure  
 $t_p$  = Temps pratique d'arrosage, en heures

### 5.3.3 Espacement entre deux irrigations (I)

L'espacement entre deux irrigations se calcule au niveau d'une section d'irrigation comme suit:

$$I = \frac{h}{BN} \quad 4.21$$

Toutes les variables sont déjà définies. En général, on transforme I en heures en le multipliant par le nombre réel d'heures d'opération du système par jour.

### 5.3.4 Calcul de Q

Le débit nécessaire pour satisfaire les besoins de la section s'obtient par la formule suivante:

$$Q = \frac{2,78 S h}{T} \quad 4.22$$

avec:

$Q$  = Débit nécessaire pour arroser la section d'irrigation dans le temps  $T$ , en litres/seconde.

$S$  = Superficie de la section, en ha

$h$  = Hauteur d'eau appliquée ou dose d'arrosage, en mm.

$T$  = Temps disponible pour arroser la superficie  $S$ , en heures. Il est fonction du nombre d'heures d'opération par jour ( $u$ ).

=  $Iu$

### 5.3.5 Surface optimale d'arrosage par usager (s)

Pour calculer s, on tient compte d'une main d'eau standard de 25 l.p.s en Haïti, cependant certains usagers peuvent maîtriser sans difficulté 100 l.p.s. La surface optimale d'arrosage se calcule comme suit:

$$s = \frac{(QM)tp}{2,78 h} \quad 4.23$$

avec

s = Surface optimale d'une parcelle qui reçoit la main d'eau, en hectares

QM = Valeur de la main d'eau, en l.p.s

tp = Temps pratique d'arrosage, en heures

h = Hauteur d'irrigation ou dose d'arrosage, en mm

### 5.3.6 Répartition du débit Q

Après avoir déterminé s et QM, il est fondamental de calculer le nombre de "mains d'eau" que comporte le débit Q; ainsi, on pourra établir un bon horaire de distribution d'eau qui tient compte de toute les relations "sol-plante-eau".

Le nombre de "main d'eau" s'exprime comme suit:

$$M = \frac{Q}{QM} \quad 4.24$$

avec

M = Nombre de mains d'eau ou nombre de parcelles de superficie unitaire s que l'on peut arroser en même temps.

Q = Débit total disponible au niveau de la section, en l.p.s.

QM = Module d'irrigation ou main d'eau que peut manier l'utilisateur, en l.p.s.

## ANNEXE

## LE SOL

## 1.1 Détermination de la texture du sol par la méthode du toucher

## 1.1.1 Objectifs

Quand on est sur le terrain et qu'on n'a pas le temps d'effectuer des analyses granulométriques au laboratoire, on peut déterminer le groupe textural auquel appartient un échantillon de sol par la méthode du toucher. Cette technique est utilisée surtout dans les études préliminaires et les explorations; ses résultats ne peuvent pas servir à la planification et à la programmation de l'irrigation.

## 1.1.2 Principe

En général, on prend une poignée du sol intéressé, sec ou humide. On la presse fortement, on peut aussi la froter entre le pouce et les autres doigts de la main.

## 1.1.3 Interprétation des résultats.

## 1- Cas du sable et du sable franc

- Sol sec - L'échantillon est granulaire, les particules se sentent facilement quand on les presse dans la main. Elles tombent lourdement en absence de pression.

Sol humide L'échantillon soumis à la pression forme une pâte qui s'effrite au toucher.

## 2- Cas du sol franc sableux

Sol sec Quand on comprime l'échantillon sec, il se forme une boule qui s'effrite facilement au toucher.

- Sol humide: Soumis à la pression, l'échantillon donne une boule qui peut être maniée avec soin sans s'effriter.

### 3- Cas du sol franc

- Sol sec : En comprimant l'échantillon sec, il se forme une boule qui peut être maniée délicatement sans se briser.
- sol humide : L'échantillon humide pressé donne une pâte qui peut être maniée librement sans se briser.

### 4- Cas du sol franc limoneux

- Sol sec : L'échantillon sec et pulvérisé est farineux et suave au toucher. Pressé, il forme une boule qu'on peut manier en toute liberté sans se briser.
- Sol humide : L'échantillon humide donne une boule qui peut être manipulée sans problèmes. Quand on comprime la boule formée entre le pouce et l'index, il ne se forme pas de fil, mais donne des brisures.

### 5- Cas du sol franc argileux

- Sol sec : En général, l'échantillon sec se brise en petits blocs durs.
- Sol humide : L'échantillon humide donne une pâte d'une grande plasticité qui peut être manipulée en toute liberté. Quand la dite pâte est frottée entre le pouce et l'index, il se forme un mince cordon qui peut soutenir son poids.



## 6- Cas du sol argileux

- Sol sec : L'échantillon sec présente des grumeaux assez durs.
- Sol humide: L'échantillon humide donne une boule complètement plastique et collant. Pressée entre le pouce et l'index, la boule devient un cordon long et flexible qui se moule facilement.

2.1 Détermination de la vitesse d'infiltration au moyen des infiltromètres à double anneau.

2.1.1 Objectifs

Apprendre au participant à estimer la vitesse d'infiltration sur les sols en utilisant les infiltromètres à double anneau.

2.1.2 Matériel

Pour mesurer la vitesse d'infiltration en un point donné, on utilise le matériel suivant:

- 1- Deux infiltromètres de double anneau complets
- 2- Une règle graduée
- 3- Un chronomètre
- 4- Une réserve d'eau (environ 100 litres)
- 5- Un registre de données (voir tableau A.II.1)
- 6- Papier logarithmique
- 7- Madriers en bois dur
- 8- Masse
- 9- Pelle
- 10- Pioche
- 11- Niveau maçon
- 12- Plastique
- 13- Ruban métrique

2.1.3 Principe

2.1.3.1 Préparation du terrain aux points sélectionnés.

- Mesures en surface : A planir la surface sans tasser le sol, en dégageant un carré de 0.80 m de côté

- Mesures en profondeur: A la profondeur choisie, creuser une tranchée de 0.80 à 1.00 mètre de côté et aplanir la surface sans la tasser.

#### 2.1.3.2 Mise en place des infiltromètres (double anneau)

En général, on effectue deux essais simultanés pour une mesure d'infiltration. La mise en place des infiltromètres se fait comme suit:

- Les deux infiltromètres doivent être installés à environ deux mètres l'un de l'autre sur une surface continue
- Les emplacements préparés sont mouillés légèrement
- Les anneaux sont enfoncés dans le sol entre 5 et 10 cm en utilisant les madriers en bois dur et la masse. L'horizontalité de l'infiltromètre se mesure à l'aide du niveau maçon.

#### 2.1.3.3 Procédé de mesure de la vitesse d'infiltration

- On remplit les anneaux intérieurs et extérieurs au même niveau. On doit prendre soin de remplir les anneaux en brisant le jet pour éviter de disperser les particules d'argile, ce qui pourrait provoquer un colmatage des pores du sol. La hauteur d'eau idéale est de l'ordre de 10 cm et elle ne doit pas descendre à moins de 3 cm au cours des mesures.
- La lecture de l'infiltration se fait dans le cylindre interne. L'eau entre les deux anneaux sert à amortir l'infiltration latérale. C'est la raison pour laquelle il est indispensable de maintenir un niveau d'eau constant dans les deux cylindres.
- Sur les sols très perméables, on doit placer une feuille de plastique mince dans la cavité du cylindre interne pour empêcher l'infiltration de l'eau avant le début des mesures. Au

moment de la première lecture, on doit enlever rapidement la feuille de plastique.

- Les lectures se font au moyen d'une règle graduée ou de tout autre dispositif qui permet d'estimer avec précision la descente du niveau de l'eau dans le cylindre interne. Les lectures se font avec des intervalles croissants de une, deux, cinq, dix ... minutes en tenant compte de l'infiltration lente ou rapide. Le temps de prélèvement minimum de données est de deux heures.
- En général les données sont collectées sur un registre dont un prototype est présenté au tableau A.II.1. Les informations consignées dans ce registre se résument comme suit:
  - Sur la colonne 1, on enregistre l'heure à laquelle chaque mesure est effectuée.
  - Sur la colonne 2, on porte la descente croissante du niveau de l'eau.
  - Sur la colonne 3, on porte les accroissements de l'infiltration en centimètres entre deux lectures.
  - Sur la colonne 4, on porte les intervalles en minutes entre deux lectures.
  - Sur la colonne 5, on porte l'infiltration accumulée à chaque lecture.
  - Sur la colonne 6, on porte le temps accumulé
  - Dans la partie inférieure du registre, on consigne toutes les observations relatives au type de sol, à la végétation, etc...

TABLEAU A.II.1 Registre de données pour le test d'infiltration

(1) Temps (Heures)	(2) Descente de l'eau "H" (cm)	(3) " $\Delta H$ " (cm)	(4) " $\Delta t$ " (mn)	(5) $\sum \Delta H = I$ (cm)	(6) $\sum \Delta t = t$ (mn)
1- Identification et localisation du site:  2- Opérateur  3- Date			4- Remarques générales:		

#### 2.1.3.4 Traitement des données collectées

Les données sont traitées en utilisant le modèle de Kostiakov-Lewis lequel s'exprime comme suit:

$$I = at^n \quad 2.1$$

avec

I = Infiltration accumulée, en cm

t = Temps durant lequel la hauteur d'eau "I" s'est infiltrée en mn.

a et n sont des paramètres qui dépendent respectivement du type de sol et de l'humidité (au début des mesures) du sol.

L'objectif final du traitement est la détermination de a et n. En général on utilise trois méthodes; ce sont:

- 1o) La méthode statistique des moindres carrés;
- 2o) La méthode graphique;
- 3o) La méthode de la pente moyenne.

Ces trois méthodes se basent sur la linéarisation de l'équation 2.1, laquelle devient:

$$\log I = \log a + n \log t \quad 2.2$$

#### 2.1.3.5 Calcul des indices et interprétation des résultats

Après avoir déterminé a et n, on calcule l'infiltration basique (I<sub>b</sub>) et le temps nécessaire pour l'infiltration d'une lame d'eau 10 cm (t<sub>10</sub>). Ces deux indices s'expriment comme suit:

$$I_b = 60 n a (600 (1-n))^{n-1} \quad 2.3$$

$$t_{10} = \left(\frac{10}{a}\right)^{1/n} \quad 2.4$$

avec:

$I_b$  = Vitesse d'infiltration basique, en cm/heure

$t_{10}$  = Temps d'infiltration d'une lame d'eau de 10 cm, en minutes

Les valeurs de  $I_b$  et  $t_{10}$  sont interprétées en fonction des classifications présentées aux tableaux A.II.2 et A.II.3

TABLEAU A.II.2 Classification des vitesses d'infiltration selon Rickard et Cossens 1965.

Classe	Vitesse d'infiltration basique mm/h	Désignation de l'infiltration	Texture du sol
I	< 2,5	très lente	argileuse
II	2,5- 15,0	lente	limono-argileuse
III	15,0- 28,0	moyenne	franche
IV	28,0- 53,0	élevée	limono-sableuse
V	53,0	très élevée	sableuse

TABLEAU A.II.3 Classes d'infiltration en fonction du temps d'application d'une hauteur d'eau de 10 cm.

Classe	temps en heures
Marginale (trop lente)	20 - 40
Défavorable (lente)	8 - 20
Favorable	15 - 8
Défavorable (rapide)	1,5 - 1,0
Marginale (trop rapide)	1,0 - 0,5

#### 2.1.4 Exemple

Dans un test d'infiltration effectué à St Raphael le 26 Septembre 1981, au moyen des infiltromètres à double anneau, on a collecté les données qui sont présentées dans le tableau A.II.4

Déterminer:

- 1o) L'équation de l'infiltration accumulée (Kostiakov-Lewis)
- 2o) La vitesse d'infiltration basique
- 3o) Le temps pour l'infiltration d'une lame d'eau de 10cm

#### 2.1.4.1 Solution

Nous adoptons la méthode de la pente moyenne, car bien qu'étant simple, les résultats qu'elle donne ne diffèrent pas significativement de ceux obtenus avec la méthode des moindres carrés (la plus précise).



## 1- Méthode de la pente moyenne

- a) On calcule les logarithmes de I et t
- b) On détermine la pente  $n_i$  pour chaque lecture "i",  $n_i$  se calcule comme suit:

$$n_i = \frac{(\log I_i - \log I_1)}{(\log t_i - \log t_1)} \quad 2.5$$

avec:

$n_i$  = La pente de la droite de l'infiltration accumulée pour la période allant de la lecture 1 à la lecture i.

$\log I_i$  = Le logarithme de l'infiltration accumulée à la lecture i

$\log t_i$  = Le logarithme du temps accumulé à la lecture i.

TABLEAU A.II# Registre d'un test d'infiltration effectué à St Raphael

	1	2	3	4	5	6
	Temps (Heures)	Descente de l'eau "H" (cm)	H (cm)	t min	H = I cm	t = t min
0	6 h 48	0.0	0.0	0	0	0
1	6 : 53	2.2	2.2	5	2.2	5
2	7 : 03	4.6	2.4	10	4.6	15
3	7 : 18	7.0	2.4	15	7.0	30
4	7 : 28	8.3	1.3	10	8.3	40
5	7 : 38	9.5/0.0	1.2	10	9.5	50
6	7 : 53	2.2	2.2	15	11.7	65
7	8 : 13	5.3	3.1	20	14.8	85
8	8 : 33	8.1	2.8	20	17.6	105
9	8 : 48	9.5	1.4	15	19.0	120
1- Identification et localisation du site: Saint Raphael # 1				4- Remarques générales: Sol alluvionnaire sans couverture végétale		
2- Opérateur: Léonvil SERAPHIN						
3- Date: 26 -09 - 81						

Si les mesures sont effectuées correctement, les valeurs de " $n_i$ " ne présentent pas des différences significatives. Si tel n'est pas le cas, on choisit le groupe des  $n_i$  qui se rapproche le plus.

- c) A partir des " $n_i$ " retenus, on calcule le " $n$ " moyen représentatif comme suit:

$$n = \frac{\sum_i^x n_i}{x} \quad 2.6$$

avec:

$x$  = Le nombre de  $n_i$  retenus

Sur le tableau A.II.5 nous présentons les  $\log I$  et  $t$  ainsi que les valeurs de  $n_i$  et  $n$ .

- d) " $n$ " étant calculé, on estime  $\log a$  comme suit:

$$\log a = (\overline{\log I}) - n(\overline{\log t}) \quad 2.7$$

avec:

$(\overline{\log I})$  = La valeur moyenne des  $\log I_i$

$(\overline{\log t})$  = La valeur moyenne des  $\log t_i$

- e) A partir de  $\log a$  on tire " $a$ " comme suit:

$$a = \text{anti log } a \quad 2.8$$

TABLEAU AII.5 Exemple de détermination des indices de l'infiltration par la méthode de la pente moyenne.

Lecture "i"	log I	log t	ni	ni %	Remarques
0					
1	0,3424	0,6990			
2	0,6628	1,1761	0,6716		
3	0,8451	1,4771	0,6461	3,79	retenu
4	0,9191	1,6021	0,6386	4,91	retenu
5	0,9777	1,6990	0,6353	5,41	retenu
6	1,0682	1,8129	0,6516	2,98	retenu
7	1,1703	1,9294	0,6729	0,19	retenu
8	1,2455	2,0212	0,6830	1,70	retenu
9	1,2788	2,0792	0,6785	1,03	retenu
$\sum (\log I) = 8,5099$ $\sum (\log t) = 14,496$ $(\overline{\log I}) = 0,9455$ $(\overline{\log t}) = 1,6107$ $\sum ni = 5,2776$ $n = 0,6597$ $\log a = 0,1171$ $a = 0,7637$			$I = 0,7637 t^{0.6597}$ $I_b = 4,95 \text{ cm/h}$ $t_{10} = 62 \text{ min.}$		
$\log a = (\log I) - n (\log t)$ $a = \text{anti log } a$			$ni = \frac{(\log I_i - \log I_1)}{(\log t_i - \log t_1)}$ $\Delta ni = \frac{(ni - n1)}{n1} \times 100$ $I_b = 60 na \left[ 600 (1-n) \right]^{n-1}$ $t_{10} = \left( \frac{10}{a} \right)^{\frac{1}{n}}$		

2.1.5 Interprétation des indices et des paramètres.

1- Infiltration basique ( $I_b = 49.5$  mm/h)

En nous référant au Tableau A.II.2 l'infiltration basique calculée ( $I_b = 49.5$  mm/heure) appartient à la classe IV c'est à dire au groupe des infiltrations rapides, associé au sol limono-sableux.

2- Temps d'application d'une hauteur d'eau de 10 cm.

$$t_{10} = 62 \text{ minutes} = 1,033 \text{ heure}$$

Selon le Tableau A.II.3 la vitesse d'infiltration est classée défavorable par excès.

2.2 Détermination de la conductivité hydraulique en absence d'une nappe par la méthode Porchet ou méthode du trou de tarière inversé.

2.2.1 Objectifs

Apprendre au participant à déterminer rapidement la conductivité hydraulique quand la nappe phréatique est relativement profonde.

2.2.2 Matériel

- 1- Une tarière à machoires de 8 cm de diamètre
- 2- Un ruban métrique
- 3- Une réserve d'eau (environ 100 litres)
- 4- Un chronomètre
- 5- Un registre de données (tableau A. II.6)

2.2.3 Principe

Le test de la conductivité hydraulique au-dessus d'une nappe phréatique désigné par les français sous le nom de méthode Porchet, consiste à creuser un orifice, à le remplir d'eau et à mesurer la vitesse avec laquelle le niveau d'eau descend dans l'orifice.

Les étapes de cette méthode sont les suivantes:

- 1o) On ouvre un orifice avec une tarière de 8 cm de diamètre à la profondeur voulue. Dans le cas où l'on veut avoir la conductivité pour les différents horizons du sol, on ouvre un profil en escalier et les tests sont effectués sur les marches de l'escalier (fig. A.II.1).

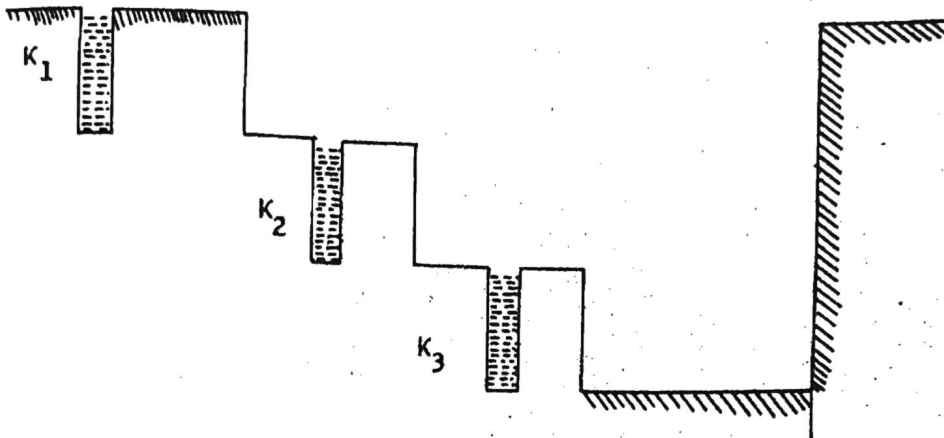


Fig. A.II.1 Schéma d'un profil en escalier pour le test de conductivité hydraulique par horizons.

- 2o) On mesure la profondeur du trou avec un ruban métrique.
- 3o) On remplit d'eau le trou de tarière pour le saturer.
- 4o) Après dix ou quinze minutes de saturation, on fait les mesures proprement dites.

TABLEAU A.II.6 Registre de données pour le test de conductivité.

## 2.1.3.4 Traitement des données collectées

1	Les données sont traitées en utilisant le modèle de Kostikov			
Lecture i	Leis lequel s Heure de lecture	exprime comme suit: Temps ac- cumulé (ti) $I = at^n$	Baisse de l'eau "Δhi"	Hauteur d'eau dans le trou "hi"
				$hi + \frac{r}{2}$
avec	<p>I = Infiltration accumulée, en cm</p> <p>t = Temps durant lequel la hauteur d'eau "I" s'est infiltrée en mn.</p> <p>a et n sont des paramètres qui dépendent respectivement du type de sol et de l'humidité (au début des mesures) du sol.</p> <p>L'objectif final du traitement est la détermination de a et n. En général on utilise trois méthodes; ce sont:</p>			
1- Identification et localisation du site:	<p>1o) La méthode statistique des moindres carrés; Profondeur du trou (H) =</p> <p>2o) La méthode graphique;</p> <p>3o) La méthode de la pente moyenne.</p> <p>Ces trois méthodes se basent sur la linéarisation de l'équation 2.1, laquelle devient:</p>			
2- Opérateur:	$\log I = \log a + n \log t$ Rayon du trou (r)			
2.1.3.5 Calcul des indices et interprétation des résultats	Après avoir déterminé a et n, on calcule l'infiltration basique			
3- Date (Ib) et le temps nécessaire 10 cm (t <sub>10</sub> ).	<p>6- Observations générales:</p> <p>pour l'infiltration d'une lame d'eau</p> <p>Ces deux indices s'expriment comme suit:</p>			



## 2.2.3.1 Mesure

- 1o) On remplit le trou jusqu'à un repère placé à sa limite supérieure.
- 2o) On enregistre rapidement la baisse du niveau de l'eau par rapport au repère.
- 3o) En général, on fait deux à trois mesures dans les sols francs et argileux. Sur les sols sablonneux, il se peut qu'on soit obligé d'effectuer les mesures trois à six fois.
- 4o) Les données sont collectées sur un registre dont un prototype est présenté au tableau A.II.6 les informations qui s'y trouvent peuvent se résumer comme suit:

- Colonne 1 : On porte le numero de chaque lecture "i"
- Colonne 2 : On enregistre l'heure à laquelle chaque lecture "i" est effectuée.
- Colonne 3 : On porte le temps accumulé à chaque lecture "ti".
- Colonne 4 : On enregistre la baisse du niveau de l'eau " $\Delta h_i$ "
- Colonne 5 : On porte la hauteur d'eau qui reste dans le trou "hi". On a:

$$h_i = H - \Delta h_i \quad 2.8$$

avec:

H = Profondeur totale du trou de tarière par rapport au repère.

- Colonne 6 : On porte  $h_i + \frac{r}{2}$ , avec "r" comme le rayon du trou de tarière (r = 4 cm)

Dans la partie inférieure du registre, on consigne toutes les observations utiles faites sur le terrain.

### 2.2.3.2 Traitement des données collectées et interprétation des résultats

On calcule la conductivité hydraulique "K" en utilisant le modèle suivant:

$$K = 1,15 r \frac{\log (h_1 + \frac{r}{2}) - \log (h_n + \frac{r}{2})}{t_n - t_1} \quad 2.9$$

avec:

- $r$  = Rayon du trou de tarière ( $r = 4$  cm);
- $h_1$  = La hauteur d'eau dans le trou à la première lecture retenue;
- $h_n$  = La hauteur d'eau dans le trou à la dernière lecture retenue;
- $t_1$  = Temps accumulé à la première lecture retenue;
- $t_n$  = Temps accumulé à la dernière lecture retenue

En général, on présente  $(h_i + \frac{r}{2})$  en fonction de  $t_i$  sur papier semi logarithmique, on obtient une ligne droite avec une tangente  $\alpha$ . La relation 2.9 devient:

$$K = 1.15 r \operatorname{tg} \alpha \quad 2.10$$

La valeur de K est interprétée en fonction de la classification présentée au tableau A.II.7

TABLEAU A.II.7 Classification de la conductivité hydraulique "K" reportée par Ortiz Villanueva, Chapingo Mexico, 1977

Classe	K (mm/h)	Désignation
I	< 1,5	très lente
II	1,5 - 5,0	Lente
III	5,0-150,0	Modérée
IV	150,0-250,0	rapide
V	250,0	très rapide

#### 2.2.4 Exemple

Dans un test de conductivité hydraulique effectué sur la ferme Papaye à Hinche le 27 Juillet 1984, au moyen d'un trou de tarière inversé, on a collecté des données qui sont présentées au tableau A.II.8

Déterminer la conductivité hydraulique

- Solution

Pour la solution du problème, on utilise les données des colonnes 3 et 6 représentées au tableau A.II.8

Un résumé du calcul de K se trouve au tableau A.II.9.

TABLEAU A.II.8 Registre des données pour un test de perméabilité sur la ferme Papaye à Hinche.

1	2	3	4	5	6
Lecture "i"	Heure de lecture	$t_i$ temps accumulé (min)	$h_i$ Baisse de l'eau (cm)	$h_i$ Hauteur d'eau dans le trou (cm)	$h_i + \frac{r}{2}$ (cm)
1	6 h 52	0	0.00	46.00	48.00
2	6 : 57	5	1.60	44.40	46.40
3	7 : 02	10	2.55	43.45	45.45
4	7 : 07	15	3.40	42.60	44.60
5	7 : 12	20	3.90	42.10	44.10
6	7 : 17	25	4.30	41.70	43.70
7	7 : 22	30	4.70	41.30	43.30
8	7 : 27	35	4.90	41.10	43.10
9	7 : 32	40	5.30	40.70	42.70

1- Localisation du site et identification - Ferme Papaye à Hinche - Profil # HB-1	5- Rayon du trou (r) = 4 cm
2- Opérateur: Edgar GOUSSE Etudiant en Agronomie	6- Observation générales - Mesure effectuée dans la couche supérieure allant de la surface du sol à 46 cm. - Sol de couleur noire - Sans végétation - Texture argileuse sèche présentant des mottes.
3- Date: 27 Juillet 1984	1- $h_i = H - \Delta h_i$
4- Profondeur du trou (H) = 46 cm	

TABLEAU A.II.9 Exemple du calcul de la conductivité hydraulique "k",

Lecture i	t <sub>i</sub>	$h_i + \frac{r}{2}$	$\log \left( h_i + \frac{r}{2} \right)$	Observations
1	0	48.00	1.6812	
2	5	46.40	1.6665	
3	10	45.45	1.6575	
4	15	44.60	1.6493	
5	20	44.10	1.6444	
6	25	43.70	1.6405	
7	30	43.30	1.6365	
8	35	43.10	1.6345	
9	40	42.70	1.6304	

Calcul.-

$$K = 1.15 r \frac{\log (h_1 + r/2) - \log (h_n + r/2)}{t_n - t_1} = \text{tg } \alpha$$

$$K = 1.15 \times 4 \frac{\log 48 - \log 42.70}{40 - 0} = 0.00585 \text{ cm/min}$$

$$K = 3.51 \text{ mm/heure}$$

$$k = 0.084 \text{ m/jour}$$

En nous référant au tableau A.II.7 la conductivité hydraulique est classée lente.

Calcul de l'évapotranspiration réelle par la méthode de Blaney-Criddle adaptée par la FAO.

## 3.1

## Généralités

L'approche adoptée dans le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) a été formulée par le groupe de la FAO sur les besoins en eau des cultures. Nous retenons particulièrement l'adaptation qui est proposée pour la formule de Blaney et Criddle.

Pour connaître l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture, on a étudié le rapport qui existe "entre une valeur de référence (ET<sub>o</sub>) définie comme étant" le taux d'évapotranspiration d'une surface étendue de gazon vert, ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, poussant activement, ombrant complètement le sol et ne manquant pas d'eau" et l'évapotranspiration réelle (ETR). Pour une culture donnée, le stade de développement et les conditions climatiques prédominantes sont représentés par les coefficients culturaux "K<sub>c</sub>". Pour une période donnée de 30 ou de 10 jours, on obtient ETR à l'aide de la formule suivante:

$$ETR = K_c ETo \quad 3.1$$

avec:

ETR = Evapotranspiration d'une culture exempte de maladie, poussant dans un vaste champ (un ou plusieurs hectares) dans des conditions pédologiques optimales, notamment du point de vue de la teneur en eau et de la fertilité, et réalisant à plein le potentiel de production de cette culture dans le milieu de croissance donné.

### 3.2 Calcul de ETo suivant la méthode de Blaney-Criddle.-

#### 3.2.1 Relations recommandées.

L'approche originale de Blaney-Criddle fait intervenir la température ( $t$ ) et le pourcentage d'heures diurnes ( $p$ ) comme variables climatiques pour prédire l'effet du climat sur l'évapotranspiration, c'est à dire le facteur de consommation d'eau ( $f$ ).

Ce facteur  $f$  ( en mm ) s'exprime comme suit:

$$f = (0.46 t + 8.13)p \quad 3.2$$

où:

- $t$  = la moyenne des températures journalières en °C;
- $p$  = Pourcentage journalier moyen d'heures diurnes annuelles tiré du tableau A.III.1 pour un mois et une latitude donnée.

Le facteur  $f$  est exprimé en mm par jour et représente la valeur moyenne du mois en question.

Pour les valeurs "f" de la formule Blaney - Criddle ainsi déterminées, la fig. A.III.1 montre quelles sont les relations recommandées pour estimer ETo. La valeur de  $f$  figure en abscisse et l'on peut lire la valeur de ETo en ordonnée. La figure A.III.1 présente les relations pour 3 niveaux d'humidité diurne minimale (HR min) et 3 niveaux du rapport entre les heures d'insolation réelles et la durée astronomique possible d'insolation ( $\frac{n}{N}$ ). On donne en outre les relations pour trois gammes de conditions de vent pendant les heures diurnes ( $U$ ) à une hauteur de 2 m. Pour ce qui est des conditions météorologiques générales, on peut trouver les renseignements nécessaires, y compris HR min,  $\frac{n}{N}$  et  $U_2$  dans les publications contenant des descriptions du temps et auprès des sources d'informations locales.

Tableau A.III-1 POURCENTAGE JOURNALIER MOYEN (p) DES HEURES ANNUELLES DE  
LUMIERE DIURNE SOUS DIFFERENTES LATITUDES

Latitude Nord " Sud 1/	Jan Juil	Fev Août	Mars Sept	Avr Oct	Mai Nov	Juin Dec	Juil Jan	Août Fev	Sept Mars	Oct Avr	Nov Mai	Dec Juin
60°	0,15	0,20	0,26	0,32	0,38	0,41	0,40	0,34	0,28	0,22	0,17	0,13
58	0,16	0,21	0,26	0,32	0,37	0,40	0,39	0,34	0,28	0,23	0,18	0,15
56	0,17	0,21	0,26	0,32	0,36	0,39	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,16
54	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,38	0,37	0,33	0,28	0,23	0,19	0,17
52	0,19	0,22	0,27	0,31	0,35	0,37	0,36	0,33	0,28	0,24	0,20	0,17
50	0,19	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,20	0,18
48	0,20	0,23	0,27	0,31	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,19
46	0,20	0,23	0,27	0,30	0,34	0,36	0,35	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20
44	0,21	0,24	0,27	0,30	0,34	0,35	0,34	0,32	0,28	0,24	0,21	0,20
42	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,34	0,31	0,28	0,25	0,22	0,20
40	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32	0,34	0,33	0,31	0,28	0,25	0,22	0,21
35	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,22
30	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31*	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
25	0,24	0,26	0,27	0,29	0,30	0,31	0,31	0,29	0,28	0,26	0,25	0,24
20	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
15	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,25
10	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26
5	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27

1/ Pour les latitudes sud, appliquer un décalage de six mois comme indiqué.



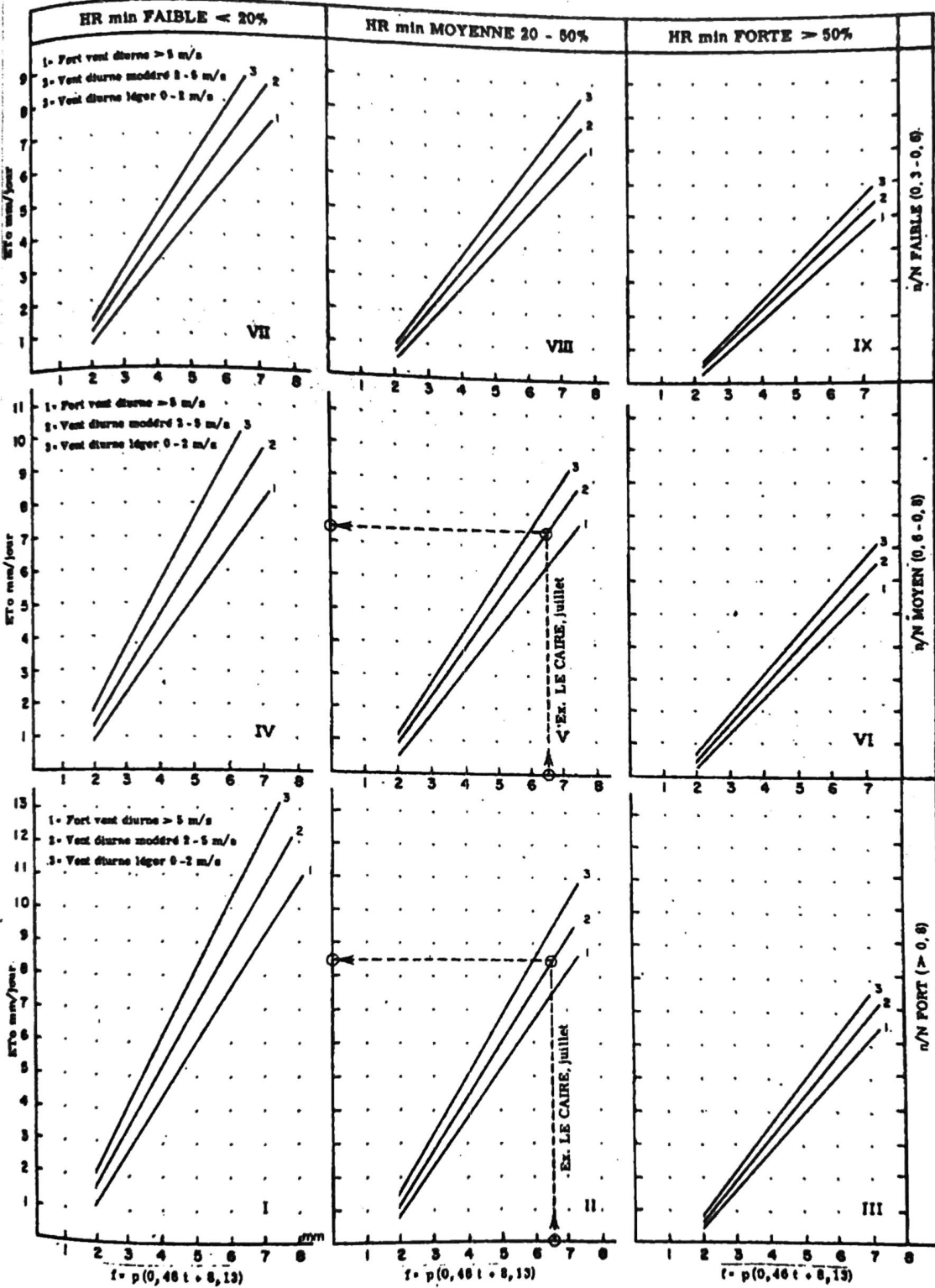


Fig AIII.1 Prédiction de ETO à partir du facteur f de Blaney-Cridde, pour différentes conditions d'humidité relative minimum, d'heures d'insolation par jour et de vent diurne

## 3.2.2 Démonstration du calcul de ETo. (Blaney et Criddle)

Figures et tableaux à utiliser:

Fig. A.III.1 Prévision de ETo d'après le facteur f de Blaney-Criddle, pour différentes conditions d'humidité relative, heures d'insolation journalières et vent diurne.

TAB. A.III.2 Pourcentage journalier moyen d'heures de lumière du jour par an, sous différentes latitudes.

Exemple:

données : Le Caire, République Arabe d'Egypte

latitude : 30°N

altitude : 95 m

mois		juillet
tmax	valeurs journalières/tmax/31	35°C
tmin	valeurs journalières/tmin/31	22°C
t moy. journalière	= $\frac{t_{moy.}}{31}$ ou $(\frac{t_{max}}{31} + \frac{t_{min}}{31}) + 2$	28,5°C
p	tiré du tableau A.III.2 pour 30°N 0,31	
f = p (0,46 t + 8,13)	0,31 (0,46 x 28,5 + 8,13)	6,6 mm/jour
HRmin:	tirée des "Climats d'Afrique" Griffith (1972), tableau XXVIII	moyenne
n/N		fort/moyen
U <sub>2</sub> pendant la journée	- d'après Rijtema et Abouklaled modéré (1973)	
ETo: Fig.A.III.1 - case II et V - ligne 2		8,0 mm/jour

En se basant sur des informations et références générales (Climats d'Afrique, Griffith 1972), on peut répartir les données concernant le Caire comme suit:

En se basant sur des informations et références générales (Climat d'Afrique, Griffith 1972), on peut répartir les données concernant le Caire comme suit:

	<u>HRmin</u>	<u>n/N</u>	<u>U<sub>2</sub> pendant le jour</u>	<u>Case</u>	<u>Droite</u>
Dec-Avril	moyenne	moyen	léger à modéré	V	1-2
Mai	faible à moyenne	fort à moyen/fort	modéré	(IV,V,I et II) 1/	2
Juin-Juillet	moyenne	fort/moyen	modéré	II,V	2
Août-Novembre	moyenne	fort	léger à modéré	II,V	1-2

	Jan	Feb	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Dec.
température °C	14	15	17,5	21	25,5	27,5	28,5	28,5	26	24	20	15,5
p moyen	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23
p(0,46 + 8,13)	3,5	3,8	4,4	5,1	6,1	6,6	6,6	6,3	5,6	5,0	4,2	3,5
ETo en mm/jour	2,8	3,3	4,1	5,2	8,0	8,2	8,0	7,2	6,2	5,2	4,0	2,8

1/ Les conditions aux limites de HRmin et de n/N suggèrent un compromis entre les cases  $\frac{IV}{I}$  et  $\frac{V}{II}$ , en utilisant dans tous les cas la courbe 2 pour vent modéré.

Tiré de FAO, les besoins en eau des cultures. Bulletin d'irrigation et de 1975, drainage No. 24

### 3.3 Choix du coefficient cultural $K_c$ .

La méthode décrite dans la section 3.2 prédit l'effet du climat sur l'évapotranspiration de la culture de référence  $E_{To}$ . Pour tenir compte de l'effet des caractéristiques culturales sur les besoins en eau des cultures, on propose des coefficients culturaux ( $K_c$ ) qui permettent d'établir la relation entre  $E_{To}$  et l'évapotranspiration de la culture ETR. La valeur  $K_c$  représente l'évapotranspiration d'une culture poussant dans des conditions optimales et produisant des rendements optimaux. ETR s'obtient en calculant  $K_c E_{To}$ .

#### 3.3.1 Valeurs recommandées

##### a) Cultures de plein champ et cultures maraichères

On trouvera ci-dessous les valeurs de  $K_c$  correspondant aux différents stades de développement des cultures. La saison végétative d'une culture comprend quatre phases. Le Tableau A.III.2 présente des coefficients culturaux  $K_c$  correspondant à chaque phase, pour des conditions climatiques différentes. Le Tableau A.III.3 indique, à titre de référence, la durée des phases de développement et de la saison végétative totale pour un certain nombre de cultures et de climats. On ne saurait trop insister sur la nécessité de recueillir sur place, et en travaillant de préférence sur des cultures irriguées, des données concernant la saison végétative et le rythme de développement des cultures.

Les quatre phases du développement des cultures sont les suivantes:

- Phase initiale: germination et démarrage de la croissance, quand la surface du sol n'est

pas, ou à peine, couverte par la culture;

- Phase de développement: depuis le moment où la phase initiale s'achève jusqu'au moment où un couvert total effectif du sol est réalisé  $\frac{1}{2}$ ;
- Phase de mi-saison: commence avec la réalisation du couvert total effectif du sol et s'achève quand débute la maturation, qui se signale par une décoloration des feuilles (haricots ou une chute des feuilles (coton). Pour certaines cultures cette phase peut se prolonger presque jusqu'à la récolte (betterave sucrière), à moins que l'on n'irrigue en fin de saison pour réduire ET (culture) et accroître ainsi le rendement et/ou la qualité (canne à sucre, coton, certaines céréales); englobe normalement la période de floraison des cultures annuelles.
- Phase d'arrière saison: depuis la fin de la mi-saison jusqu'à maturité complète ou récolte.

La Figure A.III.2 montre la marche à suivre pour déterminer les valeurs  $K_c$  correspondant aux différentes phases; pour des raisons de simplification ces valeurs seront représentées graphiquement par des droites:

- 1) Fixer les dates de plantation ou de semis d'après les renseignements recueillis sur place ou d'après les pratiques en vigueur dans des zones climatiques similaires;

1) On peut observer, sur le champ, le début de la phase de mi-saison quand la culture arrive à couvrir 70 à 80 pour cent du sol ce qui, toutefois, ne signifie pas que la culture a atteint sa hauteur de maturité. Le couvert réalisé quand  $K_c$  approche un maximum.

Tableau A. III-2 COEFFICIENT CULTURAL  $K_c$  DE CULTURES DE PLEIN CHAMP ET DE CULTURES MARAICHERES POUR LES DIFFERENTES PHASES DE LA CROISSANCE VEGETALE ET CONDITIONS CLIMATIQUES DOMINANTES

Culture	Humidité		> 70%		< 20%	
	Vent m/s		0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8
	Phase					
Toutes les cultures de plein champ	initiale	1				
"	développement	2	exploiter la fig. 8 par interpolation			
Artichauts (culture pérenne-sarclée)	mi-saison	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	à la récolte	4	0,9	0,9	0,95	0,10
Orge		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,25	0,25	0,2	0,2
Haricots (verts)		3	0,95	0,95	1,0	1,05
		4	0,85	0,85	0,9	0,9
Haricots (secs)		3	1,05	1,1	1,15	1,2
Légumineuses		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Betteraves (de table)		3	1,0	1,0	1,05	1,1
		4	0,9	0,9	0,95	1,0
Carottes		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,7	0,75	0,8	0,85
Graines de ricin		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,5	0,5	0,5	0,5
Céleri		3	1,0	1,05	1,1	1,15
		4	0,9	0,95	1,0	1,05
Maïs (doux)		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,95	1,0	1,05	1,1
Maïs (grains)		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,55	0,55	0,6	0,6
Coton		3	1,05	1,15	1,2	1,25
		4	0,65	0,65	0,65	0,7
Crucifères (choux, choux-fleurs, brocolis, choux de Bruxelles)		3	0,95	1,0	1,05	1,1
		4	0,80	0,85	0,9	0,95
Concombre		3	0,9	0,9	0,95	1,0
culture potagère		4	0,7	0,7	0,75	0,8
culture mécanisée		4	0,85	0,85	0,95	1,0
Aubergines		3	0,95	1,0	1,05	1,1
		4	0,8	0,85	0,85	0,9
Lin	mi-saison	3	1,0	1,05	1,1	1,15
	à la récolte	4	0,25	0,25	0,2	0,2
Céréales		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Lentilles		3	1,05	1,1	1,15	1,2
		4	0,3	0,3	0,25	0,25
Laitues		3	0,95	0,95	1,0	1,05
		4	0,9	0,9	0,9	1,0

TABLEAU A.III-2 (suite)

Culture	Humidité	HRmin		HRmin	
		> 70%		< 20%	
		0 - 5	5 - 8	0 - 5	5 - 8
	Vent m/s				
Melons	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	4	0,65	0,65	0,75	0,75
Mûres	3	1,0	1,05	1,1	1,15
	4	0,3	0,3	0,25	0,25
Avoine	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,25	0,25	0,2	0,2
Oignons (secs) (verts)	3	0,95	0,95	1,05	1,1
	4	0,75	0,75	0,8	0,85
	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	4	0,95	0,95	1,0	1,05
Arachides (cacahuètes)	3	0,95	1,0	1,05	1,1
	4	0,55	0,55	0,6	0,6
Pois	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,95	1,0	1,05	1,1
Poivrons (frais)	3	0,95	1,0	1,05	1,1
	4	0,8	0,85	0,85	0,9
Pomme de terre	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,7	0,7	0,75	0,75
Radis	3	0,8	0,8	0,85	0,9
	4	0,75	0,75	0,8	0,85
Carthame	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,25	0,25	0,2	0,2
Sorgho	3	1,0	1,05	1,1	1,15
	4	0,5	0,5	0,55	0,55
Fèves de soja	3	1,0	1,05	1,1	1,15
	4	0,45	0,45	0,45	0,45
Épinards	3	0,95	0,95	1,0	1,05
	4	0,9	0,9	0,95	1,0
Courges	mi-saison	3	0,9	0,95	1,0
	à la récolte	4	0,7	0,75	0,8
Betterave sucrière		3	1,05	1,1	1,2
		4	0,9	0,95	1,0
	sans irrigation le dernier mois	4	0,6	0,6	0,6
Fournesol	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,4	0,4	0,35	0,35
Tomates	3	1,05	1,1	1,2	1,25
	4	0,6	0,6	0,65	0,65
Pâté	3	1,05	1,1	1,15	1,2
	4	0,25	0,25	0,2	0,2

20. Nombre de cultures de saison fraîche ne peuvent pousser sous des climats secs et chauds. On a indiqué les valeurs kc correspondant à de telles conditions parce qu'elles peuvent se produire occasionnellement et nécessiter un relèvement des valeurs kc, notamment pour les cultures rugueuses de haute taille.

Mois, climat sec, vent léger à modéré, ETo phase initiale ~ 8,4 mm/jour

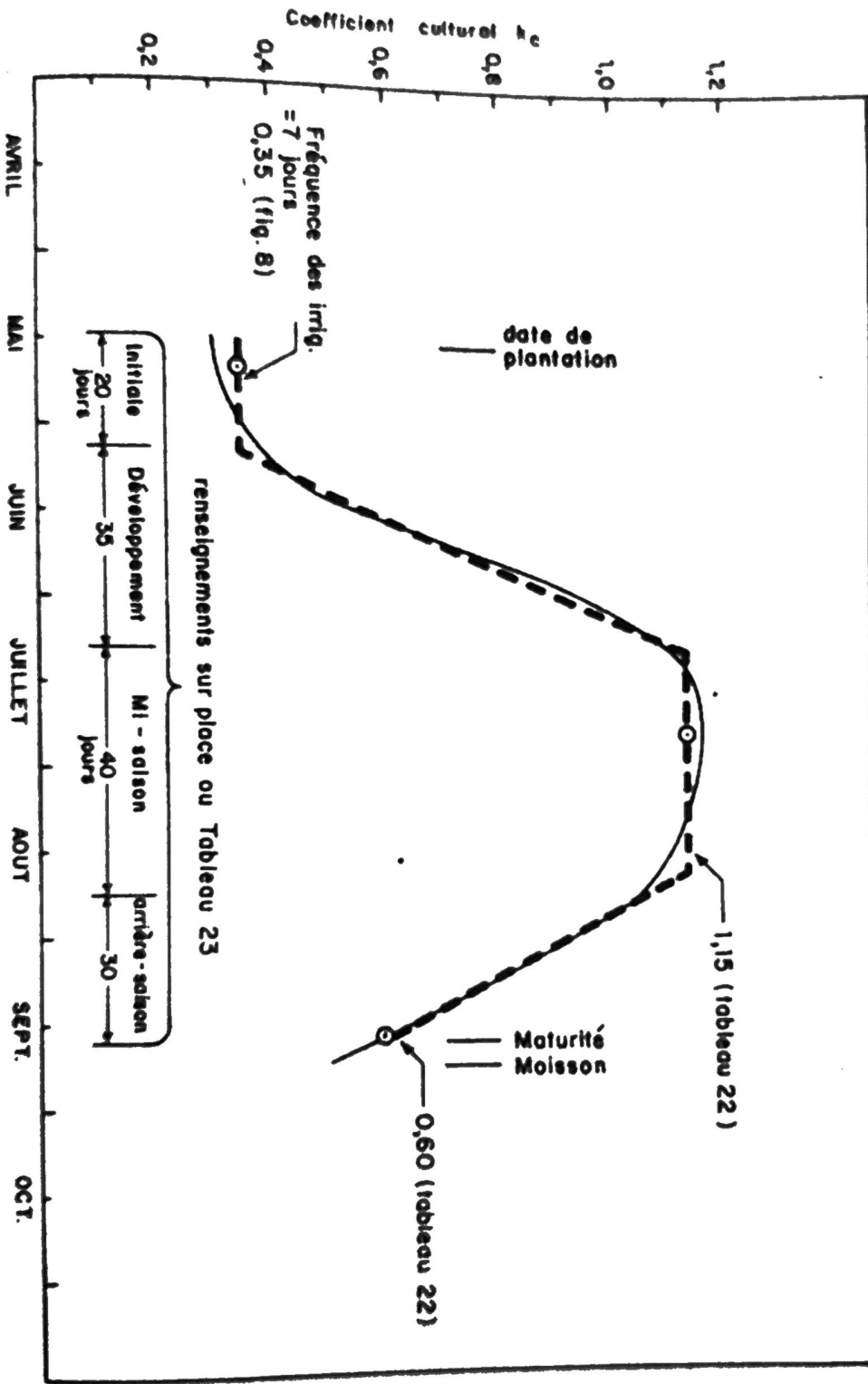


FIG. A.111 2 Exemple de courbe du coefficient (pour le maïs), Le Calire



- 2) Déterminer la durée totale de la saison végétative et des phases de développement de la culture d'après des renseignements recueillis sur place (pour des indications approximatives, voir Tableau A.III.3
- 3) Phase initiale: prévoir la fréquence des irrigations et/ou des précipitations; pour une valeur  $E_{To}$  prédéterminée, déduire  $K_c$  de la figure A.III.3 et porter la valeur  $K_c$  sur le graphique, comme indiqué à la figure A.III.2.
- 4) Phase de mi-saison: pour un climat donné (humidité et vent), choisir la valeur  $K_c$  dans le Tableau A.III.2 et dresser une droite;
- 5) Phase arrière-saison: pour l'époque de la pleine maturité ou de la récolte, choisir dans le Tableau A.III.2 la valeur  $K_c$  correspondant à un climat donné (humidité et vent), et reporter cette valeur à la fin de la saison végétative ou pleine maturité. Dresser une droite hypothétique entre les valeurs  $K_c$  correspondant à la fin de la période de mi-saison et à la fin de la saison végétative;
- 6) Phase de développement: dresser une droite hypothétique entre la valeur  $K_c$  correspondant à la fin de la phase initiale et le début de la mi-saison.

Le graphique ainsi préparé permet d'obtenir les valeurs  $K_c$  pour des période de 10 à 30 jours. On pourrait commencer par tracer une courbe adoucie, comme celle qui est représentée sur la figure A.III.2, mais cela n'ajouterait pour ainsi dire rien du point de vue de la précision.

#### EXEMPLE

Données: Le Caire, maïs planté mi-mai; pour l'ensemble de la saison végétative, les vents sont de légers à modérés

(0-5 m/s).  $HR_{min}$  est de 30-35 pour cent au milieu de l'été; pendant la phase initiale,  $E_{To}$  est de 8,4 mm/jour; pour la période initiale, on suppose une fréquence d'irrigation de 7 jours.

(1) Date de plantation	fin du printemps, début de l'été
(2) Durée des phases de croissance initiale développement mi-saison arrière-saison	renseignements obtenus sur place ou Tableau A.III.3  20 jours 35 jours 40 jours <u>30 jours</u> 125 jours
(3) Pointer les périodes comme indiqué	Figure A.III.2
(4) $K_c$ phase initiale $E_{To} = 8,4$ mm/jour fréquence d'irrigation = 7 jours	Figure A.III.3 $K_c$ initiale = 0,35
$K_c$ mi-saison vent = léger/modéré humidité = faible	Tableau A.III.2 $K_c$ mi-saison = 1,14
$K_c$ arrière-saison (fin) vent = léger modéré humidité = faible	Tableau A.III.2 $K_c$ fin de saison = 0,6
(5) Pointer la valeur $K_c$ et relier les valeurs par des lignes droites	Figure A.III.2 $K_c$ développement = 0,35 - 1,14

(6) Lire, d'après le graphique ainsi établi la valeur de Kc correspondant à la période choisie, au point médian de chaque période de 10 ou de 30 jours.

$$Kc \text{ arri\`ere-saison} = 1,14 - 0.6$$

Tiré de: FAO. Les besoins en eau des cultures. Bulletin d'irrigation 1975 et de drainage No. 24

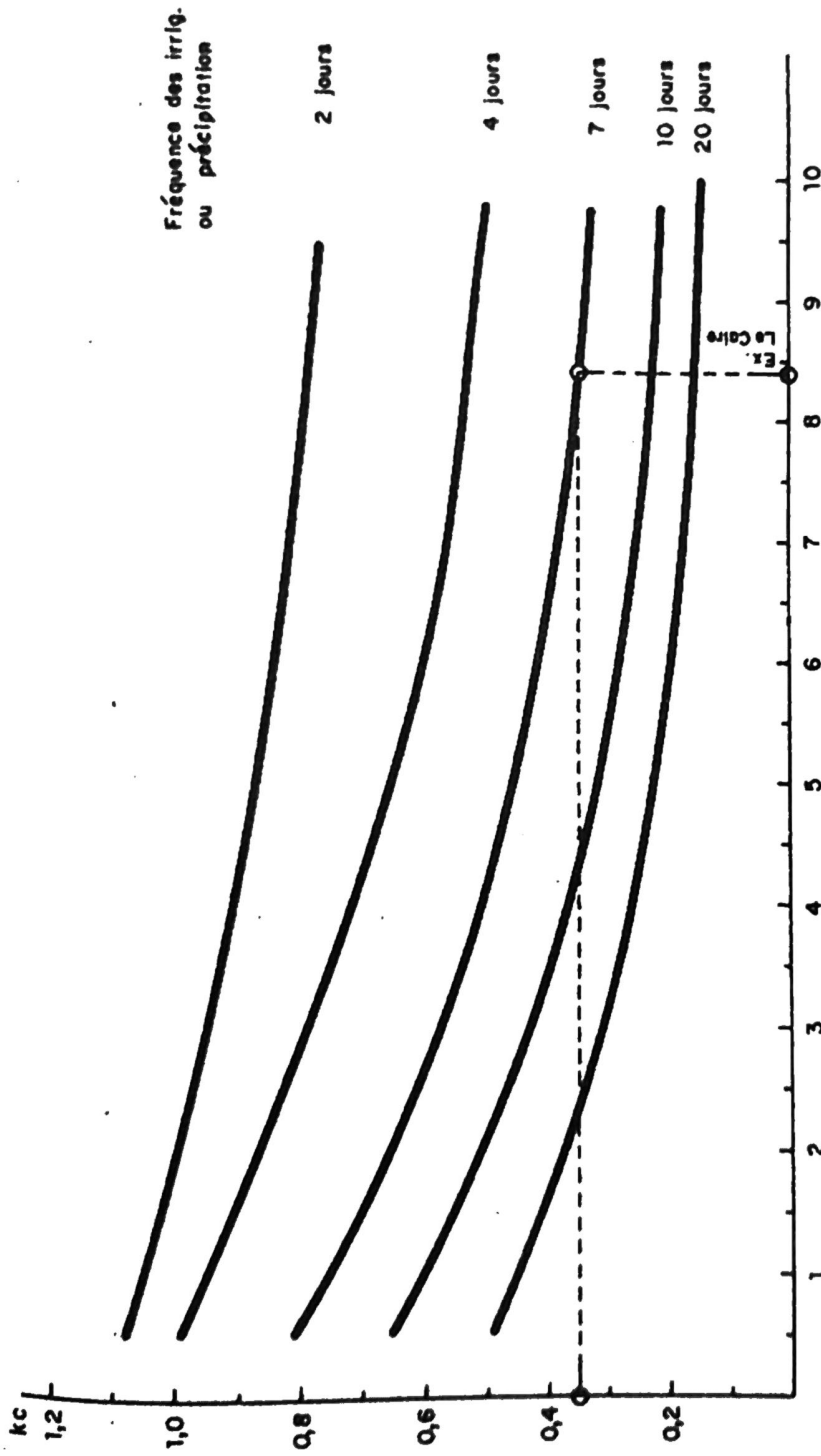
**Tableau A. III. DUREE DE LA SAISON VEGETATIVE ET DES PHASES DE DEVELOPPEMENT D'UN CERTAIN NOMBRE DE CULTURES DE PLEIN CHAMP; QUELQUES INDICATIONS**

<u>Artichauts</u>	Culture pérenne, replantée tous les 4 à 7 ans; exemple : Côte de Californie plantation en avril, 40/40/250/30 et (360) 1/; les années suivantes, les plants sont coupés au ras du sol à la fin du printemps, après la récolte, et les chiffres correspondants sont : 20/40/200/30 et (310).
<u>Orges</u>	Ainsi que le blé et l'avoine; tout dépend beaucoup de la variété; pour un blé cultivé au centre de l'Inde : plantation en novembre, 15/25/50/30 et (120); latitudes 35° - 45°, climats semi-arides; semis au début du printemps, et en Corée du sud, plantation en novembre : 20/25/60/20 et (135), pour un blé cultivé sur les hautes terres d'Afrique orientale à 2 500 m d'altitude : semis en juillet et en Corée du sud 15/30/65/20 et (150).
<u>Haricots (verts)</u>	Désert de Californie et Bassin méditerranéen, plantation en février et mars, 20/30/30/10 et (90); Désert de Californie, Egypte, Liban côtier plantation août/septembre, 15/25/25/10 et (75).
<u>Haricots (secs)</u> <u>Légumineuses</u>	Climats continentaux, plantation en fin de printemps, 20/30/40/20 et (110); Californie centrale et Pakistan occidental plantation en juin, 15/25/35/20 et (95); variétés à croissance prolongée 15/25/50/20 et (110).
<u>Betteraves</u> <u>(de table)</u>	Bassin méditerranéen, plantation au printemps, 15/25/20/10 et (70); climats méditerranéens, plantation au début du printemps et plantation avant la saison fraîche, climats désertiques, 25/30/25/10 et (90).
<u>Carottes</u>	Sous les climats semi-arides à arides, en saison chaude : 20/30/30/20 et (100); pour la saison fraîche, il faut compter jusqu'à 20/30/50/20 et (160); climats méditerranéens, plantation au début du printemps, 25/35/40/20 et (120) pouvant aller jusqu'à 30/40/60/20 et (150) pour une plantation à la fin de l'hiver.
<u>Graines de ricin</u>	Climats semi-arides et arides, plantation au printemps, 25/40/65/50 et (180).
<u>Céleri</u>	En climat semi-aride, plantation avant la saison fraîche, 25/40/95/20 et (180), saison fraîche, 30/55/105/20 et (210); climat méditerranéen humide, mi-saison, 30/40/45/15 et (125).
<u>Maïs (doux)</u>	Philippines, plantation début mars (fin de saison sèche) 20/20/30/10 et (90); climats méditerranéens, plantation en fin de printemps 20/25/25/10 et (80); climats désertiques, plantation en fin de saison fraîche 20/30/30/10 et (90); climats désertiques, plantation en début de saison fraîche 20/30/50/10 et (110).
<u>Maïs (grains)</u>	Sur les hautes terres d'Afrique orientale, plantation au printemps, 30/50/60/40 et (180); climats désertiques chauds, plantation en fin de saison fraîche, 25/40/45/30 et (140); Nigéria sub-humide, plantation en juin; Inde, plantation début octobre, 20/35/40/30 et (125); Séville Espagne, plantation début avril, 30/40/50/30 et (150).

40/40/250/30 et (360) sont des chiffres qui correspondent respectivement à la durée de la phase initiale, de la phase de développement de la culture, de la phase de mi-saison et de la phase d'arrière-saison (en jours), et (360) correspond à la durée totale de la croissance (en jours), depuis la plantation jusqu'à la récolte.

TABLEAU A.III.3 (suite)

<u>Coton</u>	Egypte, plantation en mars; Pakistan, plantation en avril-mai; Arabie du sud, plantation en septembre, 30/50/60/55 et (195); Texas, plantation en mars, récolte mécanisée, 30/50/55/45 et (180).
<u>Crucifères</u>	La longueur de la saison varie considérablement pour les différentes variétés; climats méditerranéens et continentaux, plantation en mars, 20/30/20/10 et (80); climats méditerranéens, plantation à la fin de l'hiver, 25/35/25/10 et (95); côtes méditerranéennes, plantation en automne, 30/35/90/40 et (195).
<u>Concombre</u>	Egypte, plantation en juin; Désert de Californie, plantation en août-octobre, 20/30/40/15 et (105); climats semi-arides et climats arides à saison fraîches, déserts de basse altitude, plantation au printemps, 25/35/50/20 et (130).
<u>Aubergines</u>	Climats désertiques à hivers chauds, 30/40/40/20 et (130); climats méditerranéens, plantation en fin de printemps début été, 30/45/40/25 et (140).
<u>Lin</u>	Climats à hivers froids, plantation de printemps, 25/35/50/40 et (150); Désert d'Arizona, (basse altitude), 30/40/100/50 et (220).
<u>Céréales</u>	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 20/30/60/40 et (150); climats à hivers doux, plantation octobre-novembre; Pakistan et déserts de basse altitude, 25/35/65/40 et (165).
<u>Lentilles</u>	Climats à hivers froids, plantation au printemps, 20/30/60/40 et (150); climats à hivers doux, plantation avant la saison fraîche, 25/35/70/40 et (170).
<u>Laitue</u>	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 20/30/15/10 et (75), plantation à la fin de l'hiver, 30/40/25/10 et (105); climats désertiques de basse altitude, plantation en début de saison fraîche, 25/35/30/10 et (100); déserts de basse altitude, plantation en fin de saison fraîche, 35/50/45/10 et (140).
<u>Melons</u>	Climats méditerranéens, plantation à la fin du printemps, 25/35/40/20 et (110); climats désertiques de basse altitude, plantation au milieu de l'hiver, 30/45/65/20 et (160).
<u>Mûls</u>	Pakistan, plantation en juin, 15/25/40/25 et (105); plaines centrales des Etats-Unis, plantation au printemps, 20/30/55/35 et (140).
<u>Avoine</u>	Voir orge.
<u>Ignons (secs)</u>	Climats méditerranéens, plantation au printemps, 15/25/70/40 et (150); climats semi-arides et arides désertiques, plantation avant hiver doux 20/35/110/45 et (210).
<u>Ignons (verts)</u>	Respectivement, 25/30/10/5 et (70) et 20/45/20/10 et (95).
<u>Arachides (cacahutes)</u>	Afrique occidentale, plantation en saison sèche, 25/35/45/25 et (130); plaines côtières du Liban et d'Israël, plantation en fin de printemps, 35/45/35/25 et (140).
<u>Fois</u>	Climats maritimes frais, plantation au début de l'été 15/25/35/15 et (90); climats méditerranéens, plantation au début de printemps, et climats désertiques à hiver doux, 20/25/35/15 et (95); climats méditerranéens, plantation à la fin de l'hiver, 25/30/30/15 et (100).
<u>Poivrons</u>	Frais - climats méditerranéens, plantation au début du printemps et climats continentaux, plantation au début de l'été, 30/35/40/20 et (125); climats continentaux, côtiers frais, plantation à la mi-printemps 25/35/40/20 et (120); climats désertiques, plantation avant hiver doux, 30/40/110/30 et (210).



FigAII 3 Valeur moyenne de  $k_c$  pendant la phase initiale, en tant que fonction du niveau moyen de ETo (pendant la phase initiale) et de la fréquence des irrigations ou des pluies significatives.

3.4 Conclusions et recommandations sur l'emploi de la méthode de Blaney - Criddle.

- L'adaptation de la méthode de Blaney - Criddle n'est utilisée que quand les températures sont les seules données météorologiques précises disponibles (c'est le cas pour la République d'Haïti).
- On rejette dans l'approche de la FAO l'utilisation des coefficients culturaux (K) normalement employés dans la méthode originale de Blaney - Criddle parce que:
  - Les coefficients culturaux originaux (K) sont fortement tributaires des conditions locales et que l'extrême diversité des valeurs de K que l'on trouve dans la littérature technique rend le choix de cette valeur relativement difficile.
- Si l'on veut calculer ETo moyenne journalière par la méthode de Blaney - Criddle il faut se limiter à des périodes d'un mois au minimum.

## 4- ESTIMATION DES BESOINS EN EAU

Exemple:

La Plaine de Léogane a une superficie irrigable de 6 000 ha. On aimerait savoir à partir des données agro-météorologiques les besoins en eau d'irrigation pour le calendrier agricole en vigueur.

## 4.1 Méthode de solution

1ère étape: Expression de l'équation des besoins en eau.

Si on néglige l'effet du report de l'eau dans le sol, les besoins en eau d'irrigation peuvent s'exprimer comme suit:

$$BN = PE - ETR$$

avec:

PE = Pluies efficaces à un niveau de probabilité donné, en mm;

ETR = Evapotranspiration réelle pour le plan de cultures, en mm;

BN = Besoins en eau; en mm (les valeurs négatives traduisent des déficits ou besoins en eau proprement dits tandis que les valeurs positives sont associées à des excédents)

2ème étape: Détermination des  $ETR_{ij}$ .

Pour estimer les  $ETR_{ij}$ , nous adoptons l'ancienne formule de Blaney - Criddle, car il s'agit pour nous de faire des études préliminaires; cependant pour des études détaillées et



plus précise, nous recommandons l'adaptation développée par la FAO. La formule retenue est:

$$ETR_{ij} = K_i F_j$$

avec:

$ETR_{ij}$  = Evapotranspiration réelle de la culture  $i$   
pour le mois  $j$

$K_i$  = Coefficient saisonnier pour la culture  $i$

$F_j$  = Facteur du climat pour le mois  $j$

$$= (0,46 t_j + 8,13) P_j$$

$t_j$  = Température moyenne pour le mois  $j$

$P_j$  = Pourcentage de la durée d'éclairement pour le  
mois  $j$ .

- Sur le tableau A.IV.1 on trouve les valeurs de  $P_j$  et  $t_j$  qui permettent d'estimer  $F_j$  pour la plaine de Léogane.
- Sur le tableau A.IV.2 on trouve des valeurs de  $K_i$
- Sur le tableau A.IV.3 on présente pour le calendrier agricole en vigueur dans la plaine de Léogane, les valeurs de  $ETR_{ij}$ .

**3ème étape:** Estimation des Evapotranspirations réelles pondérées  $ETR_{ij}$  pour le calendrier agricole en vigueur dans la plaine de Léogane.

- a) On calcule pour le calendrier agricole en vigueur la fraction  $C_{ij}$  des terres emblavées par la culture  $i$  pour le

mois  $j$  par rapport à la superficie totale. Pour la Plaine de Léogâne, les valeurs  $C_{ij}$  sont présentées au tableau A.IV.4

- b) En multipliant les  $C_{ij}$  du tableau A.IV.4 et les  $ETR_{ij}$  du tableau A.IV.3, on obtient les évapotranspirations réelles pondérées  $ETR_{ij}$ , lesquelles sont présentées au tableau A.IV.5. A partir des  $ETR_{ij}$ , on obtient les moyennes pondérées  $ETR_j$ .

4ème Etape: Estimation des pluies efficaces (PE)

- Sur le tableau A.IV.6, on trouve les précipitations effectives PF enregistrées dans la plaine de Léogâne. Les valeurs consignées dérivent d'une analyse fréquentielle effectuée pour le registre des précipitations pour la période (1901 - 1982).
- En général pour la plaine de Léogâne, on estime que 65% des pluies effectives sont efficaces sur le tableau A. IV.7, on présente les pluies efficaces à différents niveaux de probabilité.

5ème étape Estimation des besoins nets en eau d'irrigation (BN)

- Sur le tableau A.IV.8, on trouve les valeurs mensuelles de BN, à 80% de probabilité. Les valeurs de BN; s'obtiennent comme suit:

$$BN_j = PE_j - ETR_j$$

avec:

$BN_j$  = Besoins nets en eau d'irrigation pour le mois  $j$ ,  
en mm;

$PE_j$  = Pluies efficaces pour le mois  $j$ , en mm

$ETR_j$  = Evapotranspiration réelle moyenne pondérée pour  
le mois  $j$ , en mm.

Tableau A.IV.1 Données climatiques de la Plaine de Léogane

Mois	Température Moyenne °C	Précipitation Moyenne mm	% Durée d'éclairement
J	25.3	44	7.81
F	25.6	38	7.29
M	26.3	73	8.42
A	27.0	153	8.50
M	27.0	196	9.10
J	28.3	136	8.94
J	28.7	122	8.18
A	28.3	163	8.91
S	28.5	159	8.27
O	27.8	155	8.20
N	26.8	82	7.65
D	25.7	30	7.72
<b>TOTAL</b>		<b>1351</b>	

N.B. Source: Service Météorologique National (SMN).

TABLEAU A.IV.2 Quelques valeurs de "K" Saisonnier pour l'ancienne formule de Blaney - Criddle

<u>Cultures</u>	<u>"Valeurs de K"</u>
1- Bananes	0,80 - 1.00
2- Pois	0.6 - 0,70
3- Cacao	0.7 - 0.80
4- Café	0.7 - 0.80
5- Mais	0.75 - 0.85
6- Coton	0.60 - 0.70
7- Petites graines	0.75 - 0.85
8- Sorgho	0.70 - 0.80
9- Oléagineux	0.65 - 0.75
10- Avocat	0.50 - 0.55
11- Raisins	0.55 - 0.65
12- Citrus	0.45 - 0.55
13- Patates	0.65 - 0.75
14- Riz	1.00 - 1.10
15- Soya	0.65 - 0.70
16- Betterave à sucre	0.56 - 0.75
17- Canne à sucre	0.80 - 0.90
18- Tabac	0.70 - 0.80
19. Tomates	0.65 - 0.70

N.B: Les valeurs de "K" sont utilisées dans la formule de Blaney Criddle pour l'évapotranspiration saisonnière, c'est à dire pour tous les mois.

K est une constante.

Eta = KF

Eta = Evapotranspiration saisonnière

K = Coefficient moyen

F = Somme des f périodiques

N.B: Les valeurs les plus faibles sont pour les régions humides  
et les plus fortes pour les zones arides et semi arides.

TABLEAU A. IV.3 Evapotranspiration réelle des cultures ETRlf pour le calendrier agricole en vigueur dans  
 la plaine de Léogâne (Méthode Blaney - Criddle) mm

cultures	mois											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1 pois (haricot))	99	94	110	113								99
2 canne à sucre	122	115	136	140	158	153	157	151	140	136	124	122
3 riz	168	158	186	192	217	210	216	193	193	187	170	167
4 maïs		155	136	140	158	153	157	151	151	145		
5 arachides	93	88	103	107	120	117	120	115	107			93
6 patate	107	101	119	122	138	134	137	132	123	119	108	107
7 manioc	107	101	119	122	138	134	137	132	123	119	108	107
8 banane	130	122	144	148	168	163	167	160	149	145	131	129

TABLEAU A.IV.4 Fractions Cij de terres emblavées par la culture i pour le mois j par rapport à la superficie totale pour le plan de culture en vigueur dans la plaine de Léogane.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1- Haricots	0.12	0.12	0.04	0.04								0.11
2- Canne à sucre	0.74	0.74	0.70	0.76	0.73	0.74	0.75	0.76	0.81	0.83	0.83	0.75
3- Riz	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10	0.06
4- Maïs		0.001	0.002	0.001	0.01	0.02	0.02	0.007				
5- Arachides	0.05	0.05	0.11	0.12	0.12	0.09	0.08	0.07	0.02			0.02
6- Patate douce	0.002	0.002	0.04	0.04	0.04	0.04	0.01	0.006	0.005	0.005	0.003	0.003
7- Manioc	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
8- Banane	0,006	0,006	0,007	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,008
Total	0,998	0,999	0,979	1,061	1,00	1,00	1,00	0,993	0,995	0,995	0,993	0,991



TABLEAU A.IV.5 Evapotranspirations réelles pondérées ETR<sub>ij</sub> pour le calendrier agricole, en mm

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1 Pils (haricot)	12.07	11.41	4.74	4.87								
2 Canne à sucre	90.80	85.27	93.33	105.74	115.15	112.72	117.72	114.99	113.53	112.20	103.24	91.733
3 Riz	6.67	5.26	7.03	7.76	8.44	11.13	18.30	19.44	19.42	19.15	17.03	9.97
4 Maïs	0.10	0.21	1.55	2.0	2.58	2.37	1.02	0.42	0.15	0.15		
5- Arachides	4.30	4.13	11.13	12.77	13.88	11.01	9.03	8.53	1.72			1.56
6 Patate	0.19	0.18	5.02	5.15	5.74	5.27	2.04	0.74	0.62	0.61	0.33	0.32
7 Manioc	4.25	4.18	4.41	5.80	6.61	6.62	6.88	6.69	6.68	6.33	5.58	4.79
8 Banane	0.72	0.68	1.01	1.60	1.81	1.79	1.87	1.81	1.80	1.78	1.62	1.08
moyenne pondérée ETR <sub>j</sub>	119	112	131	146	154	151	158	153	144	140	128	121

$$ETR'_{ij} = C_{ij} \times ETR_{ij}$$

$$ETR'_j = \sum_i ETR'_{ij}$$

TABLEAU A.IV.6 Précipitations effectives (PF) espérées à différents niveaux de probabilité dans la plaine de Léogâne (mm) (Méthode Weibull).

	Pb%	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	obs.
1	10	60	99	170	285	357	218	204	275	287	280	156	106	
2	20	40	72	144	228	297	177	180	238	238	229	129	71	
3	30	32	54	105	196	253	159	155	203	215	185	113	44	
4	40	28	45	90	164	222	143	135	182	177	169	93	37	
5	50	24	38	73	153	196	136	122	163	159	155	82	30	
6	60	20	31	58	132	183	118	101	148	147	141	68	24	
7	70	13	17	46	114	163	104	85	141	118	110	58	15	
8	80	6	11	26	85	135	87	75	115	98	88	44	6	
9	90	1	7	17	56	99	55	63	84	74	52	29	0	
10	95	0	2	9	30	72	19	54	68	60	47	24	0	

Pb = Probabilité d'observer un événement supérieur ou égal à l'évènement considéré.

TABLEAU A.IV.7 Précipitation efficace PE à 65% espérées à différents niveaux de probabilité dans la plaine de Léogâne (mm).

i	Pb%	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	OBS.
1	10	39	64	111	195	232	142	133	179	187	192	101	69	
2	20	26	47	94	148	193	115	177	155	155	149	84	46	
3	30	21	35	68	127	164	103	101	132	140	120	73	29	
4	40	18	29	59	107	144	93	88	118	115	110	60	24	
5	50	16	25	47	99	127	88	179	106	103	101	53	20	
6	60	13	20	38	86	119	77	66	96	96	92	44	16	
7	70	8	11	30	74	106	68	55	92	77	72	38	10	
8	80	4	7	17	55	88	57	49	75	64	57	80	4	
9	90	1	5	11	36	64	36	41	55	48	34	19	0	
10	95	0	1	6	20	47	12	35	44	39	31	9	0	

TABLEAU A.T.V. 6 Besoins nets (BNJ) en eau d'irrigation dans la plaine de Léogâne en mm et en l.p.s/ha à 80% de probabilité.

	J	F	M	A	M	J	J	J	A	S	O	N	D	TOTAL
1- Pluies efficaces à 80% de probabilité (PEJ - mm)	4	7	17	55	88	57	49	75	64	57	80	4		
2- Evapotranspiration réelle moyenne pondérée (ETR <sub>j</sub> - mm)	119	112	131	146	154	151	156	153	144	140	128	121		
3- Besoins nets en eau d'irrigation (BNJ - mm)	115	105	114	91	66	94	109	78	80	83	48	117		
4- Besoins nets en eau d'irrigation BNJ l/s/ha <sub>2</sub>	0,43	0,43	0,43	0,35	0,25	0,36	0,41	0,29	0,26	0,31	0,39	0,44		

$$\text{BNJ (mm)} = \text{PEJ} - \text{ETR}'_j$$

$$\text{BNJ (l./s./ha)} = \frac{2,78 \times \text{BNJ (mm)}}{24 \cdot n_j}$$

avec:  $n_j$  = nombre de jours du mois.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1- Fabien L.J. 1983  
Contribution à la programmation de l'irrigation sur le périmètre irrigué de Momance. Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV). Damien Port-au-Prince, Haiti. 55 p (Mémoire)
- 2- Jean Jeune, P.K. 1983  
Programmation de l'irrigation. Méthodologie proposée pour la distribution de l'eau aux parcelles. Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV). Damien Port-au-Prince. Haiti 63 p (Mémoire)
- 3- Chery, J.M.R. 1982  
Etude comparée des rendements en grains du maïs pour différentes fréquences d'irrigation. Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV), Damien, Port-au-Prince, Haiti 48 p (Mémoire)
- 4- Nader, H. 1982  
Etude comparée des rendements du maïs, variété. Levy -7835 pour différentes hauteurs d'application d'eau (Pluviométrie, irrigation). Faculté d'Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV) Damien Port-au-Prince, Haiti 42 p (Mémoire)
- 5- Seraphin, D.L. 1981  
Metodologia para estimar las pérdidas del agua de riego en la red de conducción. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mexico 134 p (Thèse)

- 6- Aceves, N.E. 1979 El ensalitramiento de los suelos bajo riego (identificación, control y adaptación). Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mexico 382 p
- 7- Bruce, W y Stanley, V. 1979 El riego: diseño y práctica. Ed. Diana, Mexico, D.F. 350 p (2e impresion)
- 8- Ministère de la Coopération 1979 Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux cultures. Ed. Ministère de la Coopération. Paris, France, 204 p
- 9- International Institute For Land Reclamation and Improvement/ILRI 1978. Principios y aplicaciones del drenaje. Publication 16<sup>is</sup>, Vol. I, II, III et IV. P.O. Box 4567000 AA, WAGENINGEN, The Netherlands.
- 10- Servicio de Conservation de Suelos. Departamento de Agricultura de Los Estados Unidos de America 1978. Relacion entre suelo-planta-agua; Manual de Ingñieria de suelos, seccion 15: Riego Ed. Diana, Mexico D.F. 99 p.
- 11- Secretaria de Agricultura y Recursos Hydraulicos, Direccion General de Distritos y Unidades de Riego 1978. Planeacion y diseño de riego. Memorandum tecnico No.381. Mexico, D.F. 106 p.

- 12- Palacios, V.E. y Martinez, A.G. 1978. Respuesta en el rendimiento de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo. Ed Chapingo, Mexico 149 p.
- 13- Bos, M.G. y Nugteren, J. 1978. On irrigation efficiencies. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Pub. XIX, Wageningen, Holanda.
- 14- National Acedemi of Sciences. 1977. Expansion des ressources en eau dans les zones arides. Washington D.C. U.S.A. 155p
- 15- Ministère de la Coopération 1977. Mémento de l'Adjoint technique des travaux ruraux. Ed. Minsitère de la Coopération. Paris, France 799 p
- 16- Ministère de la Coopération 1977. Manuel de gestion des périmètres irrigués. Ed. Ministère de la Coopération. Paris, France 272 p.
- 17- Villanueva, B.O 1977 . Edafologia. Ed. Patena, A.C. Chapingo, Mexico. 291 p.
- 18- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de America. Personal del Laboratorio de Salinidad. 1977. Diagnostico y rehabilitacion de suelos salinos y sodicos. Ed. Limusa, Mexico, D.F. 172 p.

- 19- Palacios, V.E 1977  
Introduccion a la teoria de la operacion de distritos y sistemas de riego. Rama de Riego y Drenaje, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mexico.
- 20- Oliver, H. 1977  
Riego y Clima 4A. Impression. Ed. CECSA Mexico.
- 21- Remeniera<sup>S</sup>, G. 1976  
L'hydrologie de l'ingénieur. Ed. Eyrolles, 2a édition. Paris, France, 456 p.
- 22- Norero, A. 1976  
Evaporacion y transpiracion. CIDIAT. Merida, Venezuela. 60 p.
- 23- Grassi, J.C. 1975  
Estimacion de los usos consuntivos de Agua y requerimientos de Riego con fines de formulacion y diseño de proyectos. CIDIAT. Merida, Venezuela. 88 p.
- 24- FAO 1975  
Les besoins en eau des cultures. Bulletin d'irrigation et de drainage No.24 Rome/FAO.
- 25- Israelsen, O.W. et Hansen V.E 1965. Traité pratique de l'irrigation. 3e édition. Intercontinental Ed. New-York U.S.A.
- 26- Ven Te chow 1964  
Handbook of applied hydrology "Statistical and probability analysis of hydrology data" Mc. Graw-Hill Book Co. New-york. 1418 p.



