

Etude de l'infiltration par la méthode du bilan des volumes.

Présenté par :

BESSAFI LAID

Promoteur CHABACA M.N. Maître de Conférences INA El Harrach
09-09-2008

Devant le Jury composé de Président AIDAOUI A. Professeur INA El Harrach Examineur
HARTANI T. Professeur INA El Harrach Examineur MOUHOUCHE B. Maître de Conférences INA
El Harrach Examineur BENKHELIFA M. Maître de Conférences Université Mostaganem

Table des matières

REMERCIEMENTS .	1
Résumé .	3
Summary . .	5
ص غ ل م . .	7
Introduction . .	9
Partie bibliographique .	13
Chapitre I. L'irrigation à la raie . .	13
Introduction .	13
1.1. L'état de l'irrigation gravitaire en Algérie . .	13
1.2. Le sol .	15
1.3. L'irrigation à la raie . .	15
1.4. Débit et section mouillée en tête de raie .	18
1.5. Modes d'alimentations et phases d'irrigation .	19
1.6. Application et limites de l'irrigation à la raie .	21
1.7. Paramètres de performance .	21
1.8. Dose d'irrigation . .	23
1.9. Avantages et inconvénients de l'irrigation à la raie .	25
1.10. Conclusion .	25
Chapitre II. L'infiltration .	26
Introduction .	26
2.1. Généralités .	26
2.2. Définition . .	26
2.3. Description du processus .	26
2.4. Distribution de l'eau dans le profil du sol lors de l'infiltration. .	28
2.5. Facteurs influençant l'infiltration .	29
2.6. Infiltration horizontale .	30

2.7. Infiltration verticale et profondeur maximale mouillée. .	30
2.8. Caractéristiques de l'infiltration .	31
2.9. Notion de redistribution . .	33
2.10. Lois d'infiltrations . .	35
2.11. Conclusion .	41
Chapitre III. Le modèle du bilan des volumes .	41
Introduction .	41
3.1. Généralités .	41
3.2. Modèles hydrauliques .	42
3.3. Les composantes du bilan en volume .	45
3.4. Techniques du bilan des volumes .	49
3.5. Conclusion .	52
Conclusion . .	52
Partie expérimentale .	55
Chapitre I. Etude du milieu . .	55
1.1. Présentation du milieu . .	55
1.2. Etude climatique . .	56
1.3. Caractéristiques du sol .	60
1.4. Résultats de l'analyse de l'eau .	62
Chapitre II. Matériels et méthodes . .	63
2.1. Dispositif expérimental .	63
2.2. Protocole de mesure .	64
Chapitre III. Résultats et discussions .	67
3.1. Phase d'avancement .	68
3.2. Phase de récession .	76
3.3. Etude du ruissellement et du stockage superficiel. .	78
3.4. Etude de l'infiltration .	83
3.5. Méthode de mesure de l'infiltration sur un tronçon de raie (Équivalent au double anneau de Muntz). . .	96

3.6. Calcul du stock d'eau dans le sol . .	97
Conclusion .	101
Références bibliographiques .	103
Annexe . .	107
Liste des abréviations .	107
Annexe 1 . .	109
Annexe 2 . .	109
Annexe 3 . .	116
Annexe 4 . .	121

REMERCIEMENTS

C'est à Mr AIDAOUI A. que je dois de pouvoir soutenir cette thèse. Il a bien voulu, malgré ses lourdes tâches, présider le jury de ma thèse. Je tiens à lui exprimer toute ma reconnaissance.

Mr CHABCA M. N. qui est à l'origine de ce travail, qu'il a ensuite orienté et enrichi au cours de fréquents échanges de vue. Il a voulu accepter d'être le rapporteur de ma thèse. Je suis heureux de le remercier pour tous cela et pour ses précieux encouragements.

Je tiens à remercier Mr MOUHOUCHE B., Mr HARTANI T. et Mr BENKHELIFA M., qui ont bien voulu accepter d'examiner cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi aux personnels du laboratoire de L' INSID de Matmar et au responsable de la ferme pilote de Matmar.

Je n'aurai garde d'oublier mes collègues du département d'agronomie de Mostaganem et mes enseignants de l'INA pour leur aide directe ou indirecte, qu'ils en soient remerciés.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin par leur aide et leur soutien à la réalisation de ce travail.

Résumé

En Algérie la superficie agricole utile totale compte près de 560 000 hectares dont 6,83% seulement est irriguée. L'irrigation à la raie représente encore l'essentiel des techniques d'irrigation et couvre plus de la moitié de la superficie irriguée. Sachant qu'elle est grande consommatrice d'eau, des données montrent qu'en moyenne plus du tiers de la quantité d'eau consommée à l'hectare est perdue pour cause de conduite non efficiente. C'est pourquoi il est important de maîtriser les paramètres de performances de ce type d'irrigation en vue d'optimiser sa conduite et d'épargner à l'agriculture des pertes en eau considérables.

Dans ce travail, nous avons mené 6 essais en irrigation à la raie en faisant varier le débit d'alimentation (0,65, 1 et 2 l.s⁻¹) et la nature de la raie (bouchée ou non bouchée). L'un des principaux résultats de l'étude montre qu'il existe un seuil débit d'alimentation de la raie pour lequel le rendement hydraulique est optimum. Le choix d'une raie bouchée ou non bouchée est déterminant sur les pertes par percolation et par colature. Une bonne maîtrise de l'irrigation nécessite de prendre des longueurs de raies qui ne dépassent pas la limite de 60 m. En effet, les contraintes liées à la pente et à la rugosité de la surface du sol deviennent importantes au-delà de cette longueur.

Il s'agit également de comprendre dans quelle mesure la méthode du bilan de volumes est applicable pour évaluer les paramètres de performance de l'irrigation à la raie et d'en déduire la validité d'utilisation relative des lois d'avancement et d'infiltration en fonction des conditions expérimentales propres à chaque essai.

Globalement, nous avons recensé que la loi d'infiltration de Kostiakov modifiée est la plus adaptée aux raies non bouchées et celle de Kostiakov à régression log-linéaire aux raies bouchées. Dans ce cas, les rendements hydrauliques enregistrent en moyenne respectivement 52 % (Q=1 l.s⁻¹) et 47 % (Q = 0,65 l.s⁻¹) pour la raie bouchée et la raie non bouchée.

Mots clés : irrigation à la raie, débit, méthode du bilan des volumes, lois d'avancement et d'infiltration, rendement hydraulique.

Summary

In Algeria the surface agricultural total account close to 560 000 hectares of which 6,83 % are only irrigated. The furrow irrigation represents the essential of the irrigation techniques again and covers more of the half of the surface irrigated. Knowing that it is big consumer of water, data show that on average more of the third party of the quantity of water consumed to the hectare is lost because of non efficient conduct. It is why it is important to master the parameters of performances of this type of irrigation in order to optimize his conduct and to save to the agriculture of the losses in water considerable.

In this work, we led 6 tests in furrow irrigation to while making vary the flow rate (0,65, 1 and 2 l.s.⁻¹) and the nature of the furrow (open or closed). One of the main results of the survey shows that a doorstep flow rate of the furrow for which the good irrigation efficiency. The choice of an open or closed furrow is determinant on the losses by percolation and by outflow. A good mastery of the irrigation requires taking lengths of furrow that don't pass the limit of 60 m. Indeed, the constraints bound to the slope and the roughness of the soil surface become important beyond this length.

It is also about understanding in what measure the balance method of volumes is applicable to value the parameters of performance of the irrigation to the furrow and to deduct the validity of relative use of the laws of advancement and infiltration of it according to the experimental conditions clean to every test.

Globally, we counted that the law of infiltration of Kostiakov modified is the most adapted to the open furrow and the one of Kostiakov to log-linear regression to the closed furrow. In this case, the yield hydraulics record 52% on average respectively ($Q=1 \text{ l.s}^{-1}$) and 47% ($Q = 0,65 \text{ l.s}^{-1}$) for the clogged furrow and the furrow non gulp

Keywords: furrow irrigation, flow rate, balance method of the volumes, laws of advancement and infiltration, hydraulic output,.

ص خ لم

560 000 ##### 6,83 % #####
. #####

#####

(0.65 # 1 # 2 #/#)
(#####) . ##### #

60 # ##### .

(#####) #####
. #####

52 % ##### (##### 1 #/#) #47 %
(##### 0.65 #/#).

:##### - ##### - ##### - ##### - #####
- ##### .

Introduction

En Algérie, les ressources en eau sont globalement évaluées à 19,4 milliards de m³/an dont seulement 12 milliards sont mobilisables. En effet, 6,8 milliards de m³ d'eau sont retenues dans le Nord du pays et les autres 5,2 milliards dans les régions sahariennes. Ces potentialités correspondent actuellement à un taux de 500 m³/hab/an. Ce qui met le pays dans le groupe des pays pauvres en ressources hydriques par rapport à la moyenne mondiale du seuil de rareté de l'eau qui compte 1000 m³/hab/an. Il faut ajouter à cette situation les cycles de sécheresse que connaît l'Algérie durant ces 25 dernières années (Benaçar, 2005).

Par ailleurs, il est important de remarquer que près de la moitié des volumes d'eau mobilisés pour l'irrigation en Algérie est perdue soit durant le transport de cette eau, soit par gaspillage lié à une surestimation des besoins en des cultures ou à un choix d'espèce sur consommatrice d'eau, soit par insuffisance en matière de conduite d'arrosage (Habi et *Benmoussat*, 2008).

La littérature rapporte que près de 17% de la SAU irriguée assure 40% de la production agricole mondiale. Le reste de la production est assuré par 83% de la SAU non irriguée. Ceci correspond à une production par hectare, 5 fois plus importante en conduite irriguée qu'en conduite à sec (Mermoud, 2006). Manifestement, pour combler les besoins en nourriture de plus en plus importants dans le monde, les producteurs ne peuvent que recourir à l'intensification de leurs surfaces irriguées.

En Algérie, la surface irriguée ne représente que 6,83% de la SAU totale (Zella et *Smadhi*, 2007). De plus, les zones arides et semi aride couvrent plus de 95 % du

territoire (Halitim ,1984). Dans ces régions, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants de l'intensification de la production agricole et de l'extension des surfaces irriguées. C'est pourquoi, il faut compter sur le développement des techniques d'irrigation et sur l'expansion des surfaces irriguées pour escompter répondre au moindre coût à la demande alimentaire devenue de plus en plus importante.

Il faut rappeler que malgré la mise en œuvre de divers programmes de développement visant l'introduction de nouvelles technologies d'irrigation dans les pratiques d'arrosage en Algérie, l'irrigation gravitaire demeure la technique dominante (Benmouffok, 2004). Pas moins de 60 % des pratiques d'arrosage sont de l'irrigation à la raie (Chabaca et Messahel., 2006). Paradoxalement, on se retrouve dans la situation où au lieu de s'ouvrir sur les innovations technologiques en matière de gestion de l'irrigation, on est contraint, ne serait ce qu'à court terme, d'optimiser une technique d'arrosage traditionnelle connue pour sa grande consommation en eau avec une frange non négligeable de gaspillage et pour sa grande mobilisation en main d'œuvre. C'est pourquoi, il est important d'étudier scientifiquement les paramètres de performances de cette technique d'irrigation traditionnelle, in situ, en vue de rationaliser sa conduite. A cet effet, nous avons choisi un site expérimental localisé dans une zone irriguée où l'irrigation à la raie est la technique qui représente l'essentiel des pratiques d'arrosage. Il s'agit de la plaine de la Mina (Wilaya de Relizane). Dans cette plaine, l'irrigation est assurée en grande partie par le barrage de Sidi M'hamed Ben Ouda qui couvre une superficie irriguée de l'ordre de 17235 ha (Anonyme, 2004). Les agriculteurs utilisent cette technique d'irrigation de manière très archaïque et ne bénéficient d'aucun appui technique pour réduire les pertes en eau et économiser leurs efforts (pénibilité de travail). En effet, l'une des constatations importantes relevées dans la littérature est la perte d'eau enregistrée en irrigation dans la plaine de la Mina due essentiellement à la nature de la technique utilisée et particulièrement à la non maîtrise des paramètres qui régissent la performance de cette technique (Guemraoui et Chabaca, 2005 ; Benmouffok, 2004). Ce qui, de prime abord, nous intéresse dans la mesure où nous projetons d'étudier scientifiquement les paramètres de cette technique traditionnelle en vue d'optimiser sa conduite. Il s'avère que les paramètres les plus déterminants sur l'irrigation à la raie sont :

- la longueur de la raie
- et le débit d'alimentation,

notre étude se résume donc, à déterminer en fonction des conditions climatiques et des données en sol et en eau du milieu, la bonne adéquation entre la longueur de la raie et le débit d'alimentation pour optimiser la conduite de l'irrigation. Il est important de rappeler que les travaux qui concernent l'optimisation de la conduite de l'irrigation à la raie sont insuffisants et sont loin de correspondre à l'étendue d'utilisation de cette technique en Algérie. Outre les travaux de Chabaca (2004), qui portent sur l'amélioration de cette technique par la micro-raie, nous allons mettre en œuvre la technique du « bilan de volume », très peu utilisée en Algérie vraisemblablement par méconnaissance, pour étudier les lois d'infiltration et leurs influences sur les performances d'arrosage. Il est tout aussi important de développer des indices clairs et précis capables d'être largement vulgarisés en vue de permettre une optimisation de cette technique d'irrigation dans les périmètres irrigués telle que la plaine de la Mina. Ceci contribuera largement à minimiser

les pertes en eau afférentes à son utilisation, de valoriser cette technique d'irrigation du seul fait de son importance en Algérie et éventuellement d'augmenter les surfaces irriguées.

Partie bibliographique

Chapitre I. L'irrigation à la raie

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'état de l'irrigation gravitaire en Algérie et les différentes méthodes d'irrigation à la raie : les caractéristiques des raies en fonction de la texture du sol et de la culture ; le mode de conduite de l'irrigation (débit unique ou double débit, avec raie bouchée ou non bouchée).

1.1. L'état de l'irrigation gravitaire en Algérie

1.1.1. Généralités

En Algérie, existent deux systèmes d'irrigations, un système ancien pratiqué depuis l'antiquité qui est le gravitaire, l'autre est introduit récemment et renforcé ces dernières années par le programme du PNDA qui est le système sous pression. Selon le RGA (2003), soit 287456 exploitations pratiquent l'irrigation sur 620 687 ha. Cette superficie

irriguée couvre 7,34% de la superficie agricole utile totale et elle est répartie en, arboriculture (41,2%) cultures maraîchères et industrielles (33%) et grandes cultures (25,8%). Les deux systèmes d'irrigations sont :

1.1.2. Irrigation sous pression

Dans ce système d'irrigation on rencontre le goutte à goutte et l'aspersion, les deux systèmes nécessitent un réseau sous pression pour la mise en marche des goutteurs ou des asperseurs :

- **Irrigation par goutte à goutte** : Dans ce système, l'eau est délivrée à la plante par faible dose entraînant ainsi l'humidification d'une fraction du sol. Le système est composé d'une station de pompage, d'une unité de tête, de conduites principales et secondaires, de portes rampes et rampes et enfin de distributeurs ;
- **Irrigation par aspersion** : Dans ce système l'eau est délivrée à la plante par un jet ou mini jet. Ce système est recommandé pour les terrains en pente irrégulière avec micro relief accidenté Une installation sous pression est généralement composée d'équipements fournissant la pression nécessaire à son fonctionnement, d'une station de pompage ou réservoir régulateur de pression, d'une conduite principale et des conduites secondaires et tertiaires, des rampes et d'asperseurs.

1.1.3. Irrigation gravitaire

Dans ce système d'irrigation, l'eau est délivrée à la plante par gravité et ceci, soit par ruissellement (irrigation par planche), soit par submersion (irrigation par bassin) ou par infiltration (micros - raies). La parcelle d'irrigation peut être confectionnée soit par planche, par bassin ou par micros – raies :

- **L'irrigation par planche** : Elle consiste à faire couler une mince couche d'eau sur un sol incliné de 0,2 à 3%, le débit est fonction de l'unité parcellaire (surface de la planche) et de la perméabilité du sol. Cette technique d'irrigation n'est pas assez développée en Algérie ;
- **L'irrigation par bassin** : Elle consiste à faire inonder un sol incliné d'une pente inférieure à 0,2%, d'une couche d'eau plus ou moins épaisse, ce type d'irrigation est connu sous le nom de Robta (Pntta, 2001), il occasionne des pertes importantes de terrain due au nombre de cloisonnements, il est très utilisé au Sahara Algérien) ;
- **L'irrigation par micros - raies** : Elle consiste à faire répartir l'eau sur des raies de 4 à 6 m de longueur (sol léger) ou de 10 à 12 m au maximum (sol lourd). Chaque micro raie, s'ouvre et se ferme par une robta, reçoit complètement la main d'eau (5 à 10 l s-1), conduit à un seul débit et à extrémité aval fermée. L'ensemble des raies est alimenté par une raie principale appelée seguia. Le débit d'alimentation des raies diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la raie en tête et les pertes du débit sont évaluées à 30% en fin du parcours (Chabaca, 2004).

1.1.4. Situation actuelle de l'irrigation

Les réseaux sous pression dans les grands périmètres d'irrigations fonctionnent avec beaucoup de pertes dues aux mauvais raccordement des conduites , aux bornes d'irrigations ; par contre dans les exploitations individuelles aucune étude n'est faite pour le dimensionnement, ce qui indique que la dose d'arrosage n'est jamais respectée . En ce qui concerne le goutte à goutte, les installations ont été faites et suite à l'absence d'unités de tête, les goutteurs sont colmatés, ce qui a poussé les usagers à l'abandonner et à retourner au gravitaire. L'irrigation par micros - raies est la technique d'irrigation dominante, avec des pertes dans la seguia d'amenée d'eau de 30% (Chabaca ,2004) sans compter les pertes par percolation.

En irrigation à la raie, l'alimentation des cultures est assurée par infiltration, ce qui nous amène à connaître les lois qui régissent l'infiltration

1.2. Le sol

Son rôle est d'alimenter en eau et en éléments minéraux les cultures. C'est un réservoir dont le volume dépend de sa profondeur, ainsi que de la texture et de la structure de chacune des couches qui le constituent. Suivant l'enracinement (en profondeur et en densité) propre à l'espèce et même à la variété considérée, son volume total, réserve utile (RU) est variable, ainsi que son volume facilement utilisable (RFU) ou disponible (RD). Le sol est un système à 3 phases: solide, liquide et gazeuse. Ses propriétés physiques 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 liquide et gazeuse sont très variables. La phase solide constitue la charpente du sol, elle caractérise sa texture et sa structure.

1.2.1. Texture du sol

La texture du sol caractérise la nature, la taille et la distribution des particules solides qui le constituent (tableau 1). Elle s'exprime par l'analyse granulométrique, qui décrit les proportions relatives des diverses tailles des particules solides. Les résultats de cette analyse permettent de classer le sol en utilisant, soit le triangle textural équilatéral de l'US Département of Agriculture recommandé par Geppa (1981) in Denis (1988) soit le triangle textural rectangulaire de la société Internationale de sciences du sol, soit la courbe granulométrique.

Particules	Argile	Limon	Sable fin	Sable grossier	Gravier	Cailoux
Ø (mm)	Ø < 0,002	0,002 < Ø < 0,02	0,02 < Ø < 0,2	0,2 < Ø < 2	2 < Ø < 20	Ø > 20

Tableau 1: Classification des particules solides du sol en fonction de leur diamètre selon la classification de l'US Département of Agriculture. (Ducrocq, 1987)

1.3. L'irrigation à la raie

1.3.1. Généralités

L'irrigation consiste, pour un agriculteur, à fournir à une culture l'eau qui lui est nécessaire en complément des apports naturels en vue d'assurer une production optimale en évitant les effets négatifs d'un stress hydrique. Elle se traduit par des arrosages, recharges périodiques de la réserve en eau du sol qui alimente en permanence le système racinaire de l'ensemble des plantes constituant la culture.

L'irrigation à la raie est une des techniques d'arrosage majeure en Afrique. Elle est simple, facilement admise par les paysans qui n'ont pas d'expérience des autres techniques d'irrigations. Dans cette méthode d'arrosage, une partie seulement du sol reçoit directement l'eau. Celle-ci s'écoule dans les raies séparées par les butées (billons) sur lesquelles poussent les cultures. L'eau est apportée dans la partie supérieure de la raie et s'infiltré latéralement et verticalement dans le creux du sillon pour arroser les plantes

1.3. 2.Caractéristiques de l'irrigation à la raie

1.3.2.1. Forme des raies

La section des raies peut prendre plusieurs formes. Elle est choisie de sorte à permettre une répartition uniforme sur toute la longueur de la raie de la quantité d'eau administrée. Les raies sont généralement conçues comme suit :

- Raies triangulaires (ou sillons en "V"), de 15 à 20 cm de profondeur et de 25 à 30 cm d'ouverture (Booker, 1974 in Miloud, 1989) ;
- Raies trapézoïdales ou rectangulaires (raies plates en "U"), ce sont des rigoles larges et profondes de 20 à 30 cm d'ouverture (Sogreah, 1974).

L'expérience faite par Arrachi de Casanova (1987) tableau 2, nous montre que les raies en "V" provoquent des pertes beaucoup plus élevées (41,96%) que les raies plates (7,16%). Ces pertes sont dues à la forme de la raie. La surface de contact eau - talus de la raie est plus élevée en raie triangulaire qu'en raie trapézoïdale.

Section	Périmètre mouillé (m)		Longueur (m)	Surface mouillée (m ²)			
	Amont	Aval		Totale	Utile	Pertes	Pertes (%)
Triangulaire	0,318	0,130	200	44,8	26	18,8	41,96
Trapézoïdale	0,480	0,415	150	67,05	62,25	4,8	7,16

Tableau 2: Comparaison entre raie triangulaire et raie trapézoïdale (Arrachi de Casanova in Baallal, 2006).

Les sillons trapézoïdaux ont l'avantage de bien respecter le chevelu des racines superficielles, mais exigent un nivellement soigné.

1.3.2.2. Ecartement des raies

L'espacement des raies a pour but de garantir une humidification latérale entre deux sillons rapprochés et son choix dépend de plusieurs facteurs.

a) Culture à irriguer.

La nature de la culture détermine l'écartement entre raies, par exemple, un écartement de 0,65 à 0,70 mètre pour le maïs et de 1,5 à 1,65 mètre pour la tomate (Cemagref, 1992)

b) Nature du sol et son état d'ameublissement.

C'est ainsi que Neihmeyer et Hendrickson (1931) cités par Daifi (1994) en effectuant des travaux sur deux terrains différents (sols légers et sols lourds), ont abouti aux conclusions suivantes:

- Sols légers (limoneux – sableux): Les raies devraient être écartées de 0,60 m car l'eau pénètre rapidement en profondeur mais son étalement en largeur est très faible ;
- Sols lourds (limoneux – argileux): La distance d'écartement pouvait être portée jusqu'à 1,60 m car l'eau pénètre lentement, mais son étalement en largeur est fonction de la longueur de la raie.

1.3.2.3. Longueur de raie

La longueur dépend essentiellement de la nature du sol. Les raies plus courtes sont utilisées généralement pour les sols de texture sableuse. Cela est lié à la rapidité d'absorption d'eau et la difficulté de la rétention par rapport aux sols de type argileux. La longueur maximale d'une raie sur les sols filtrants est comprise entre 40 et 90 m alors qu'elle est comprise entre 150 et 180 m sur les sols peu filtrants (Sogreah, 1985) cité par Taoussi (2002). La détermination de la longueur d'une raie est fonction du coefficient de perméabilité (k) du sol et du module d'irrigation (Sogreah, 1974).

On a intérêt à avoir des longueurs suffisamment longues si on veut faciliter les opérations culturales et diminuer les temps de main d'oeuvre. Néanmoins, il ne faut pas tomber dans l'excès inverse car des raies trop longues interdisent de conduire des irrigations dans de bonnes conditions, même si elles sont bien planées (Cemagref, 1992).

L'utilisation des rigoles très longues provoque des pertes excessives par percolation profonde et l'érosion du sol près de l'extrémité supérieure du champ (Israelsen & Hansen, 1965).

1.3.2.4. Pente de la raie

Pour une meilleure répartition de l'eau dans le sillon, il faut choisir une pente adéquate, ce choix permet à la raie un remplissage sans qu'il y ait débordement et érosion. Selon Poiree et Ollier (1971) l'orientation des raies diffère suivant la régularité et la pente du sol. Si la pente ne dépasse pas 2%, les raies peuvent être orientées suivant le sens de la

penne ; si elle est supérieure à 2% on les dispose obliquement pour que l'eau ne circule pas trop rapidement et ne ravine pas le sol

Pour les sols érosifs le SCS a établi la formule de la pente maximale comme suit (26):

$$S_{\max} = P_{30}^{-1,30} \quad (26)$$

Avec :

$S_{(\max)}$: pente en % ;

P_{30} : la pluie de durée 30 mm de fréquence bisannuelle ;

Plus les raies sont longues, meilleure doit être la qualité de planage. On obtient immédiatement de très bons résultats avec la technique de guidage laser (Cemagref, 1992).

1.4. Débit et section mouillée en tête de raie

1.4.1. Débit en tête

Le débit en tête doit respecter la capacité des raies, pour permettre une répartition uniforme sur toute leur longueur. La vitesse de l'écoulement doit être telle que la variation de la durée d'infiltration sur toute la longueur soit acceptable. Le débit maximal à admettre en tête de raie sans danger d'érosion est donné par la formule du SCS (27) :

$$Q_{\max} = \frac{38}{S\%} \quad (27)$$

Avec :

$Q_{(\max)}$: Débit maximal en l mn^{-1} ;

$S\%$: Pente de la raie en % ;

Cette formule n'est applicable que pour les pentes $\leq 3\%$.

1.4.2. Périmètre et section mouillés

Au niveau d'une section transversale d'une raie, le contact eau - sol représente le périmètre mouillé ou section mouillée Il se traduit par l'une des formules suivantes(28) :

$$P_m = 0,265 \left(\frac{Q}{\sqrt{S}} \right)^{0,425} + 0,227 \quad (28) \quad (\text{Berthomé, 1985})$$

Avec:

P_m : Périmètre mouillé corrigé (m) ;

Q : Débit en tête (l s^{-1}) ;

S : Pente de la raie (m/m) ;

n: Coefficient de rugosité (il dépend de la nature des raies). ;

$$A_0 = \left(nQ \frac{Pm^{\frac{2}{3}}}{10^3 \sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (\text{Berthomé, 1985})$$

Avec :

Q : Débit en tête de la raie (l s^{-1}) ;

A_0 : section mouillée (m^2) ;

n: Coefficient de rugosité de Manning. ;

S: Pente de la raie (m m^{-1}).

1.4.3. Réglage du débit

Il faut régler le débit en tête de raie de façon à le maintenir constant pour respecter la dose à administrer dans la raie et ceci n'est réalisable qu'avec des dispositifs de réglage tel que :

- **Réglage par siphon** : La méthode consiste à utiliser un certain nombre de siphons pour déverser le débit voulu dans chaque sillon ;
- **Réglage par vanne** : Dans cette méthode, le réseau est dimensionné et installé avant le semis ou la plantation, au moment de l'irrigation, le débit est déversé par une simple manœuvre de la vanne.

Le débit d'alimentation doit être identique pour toutes les raies. Il doit être supérieur à l'infiltration totale pour que l'eau atteigne le bout de la raie. Le débit d'alimentation doit être inférieur au débit érosif (Cemagref, 1992).

1.5. Modes d'alimentations et phases d'irrigation

1.5.1. Modes d'alimentation

En irrigation à la raie, plusieurs modes d'alimentation sont utilisés, dans la pratique, on peut citer trois modes fréquemment utilisés:

a) Irrigation à la raie à débit unique sur terrain en pente à extrémité avale ouverte.

Le débit en tête est constant durant toute la durée de l'arrosage. Les raies ouvertes débouchent directement sur un fossé de récupération des eaux de colature.

b) Irrigation à deux débits sur terrain en pente à extrémité avale ouverte.

Pour l'amélioration du rendement hydraulique, on peut diminuer les pertes en colature en réduisant le débit d'apport en tête de raie pendant une partie de la durée d'arrosage.

Cette méthode peut ne pas être souhaitable, car elle complique la régulation du débit et accroît les besoins en main d'œuvre. On procède par un débit d'attaque durant la phase d'avancement et on le réduit pendant la phase d'entretien.

c) Irrigation par vagues sur terrain en pente.

Pour l'amélioration de l'efficacité, certains agriculteurs alimentent les raies par intermittence avec un débit constant.

d) Irrigation à débit variable continu.

Ce mode d'alimentation qui est encore en phase d'expérimentation est de faire varier le débit de façon continue, d'un débit maximal au début de l'alimentation jusqu'à atteindre le débit nul en fin d'alimentation (Kruse, Fangmeier, Hymphys et Manges, 1980).

1.5.2. Phases d'irrigation à la raie

La durée totale de l'arrosage peut se subdiviser en quatre phases principales (Fig. 1).

- **Phase d'avancement ($t_L - t_0$)** : C'est le temps entre le début de l'arrosage (T_0) et l'arrivée de l'eau à l'extrémité avale de la raie (T_L) ;
- **Phase d'entretien ($t_{c0} - t_L$)** : Quand l'eau atteint l'extrémité avale de la raie, on continue à arroser. La phase d'entretien est le temps écoulé entre le temps d'arrivée de l'eau à l'extrémité avale de la raie et le temps d'arrêt de l'alimentation ;
- **Phase de latence ($t_{r0} - t_{c0}$)** : C'est le temps compris entre l'arrêt de l'alimentation en tête et la disparition de l'eau à l'extrémité amont de la raie ;
- **Phase de récession ($t_{rL} - t_{r0}$)** : C'est le temps de disparition complète de l'eau en chaque point de la raie.

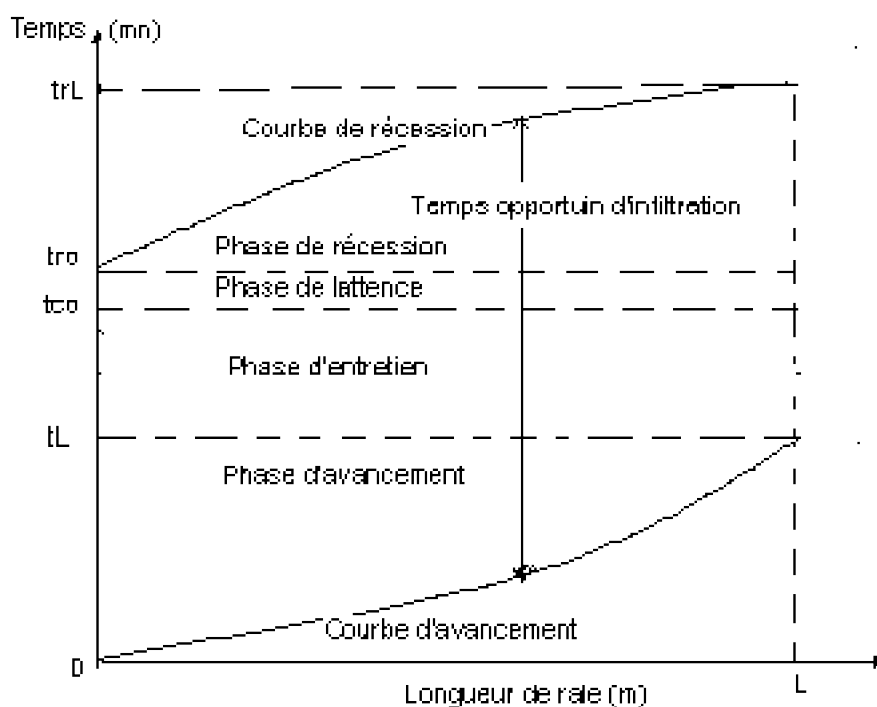


Figure 1 : Représentation schématique des différentes phases d'irrigation à la raie (Thoma & Wayne, 1998).

1.5.3. Temps d'irrigation

Le temps d'irrigation (temps d'avancement + temps d'entretien) est déterminé par le débit en tête de raie. Il varie en sens inverse du débit, pour la dose nette d'irrigation. Les irrigants adoptent souvent des règles simples qui sont (Cemagref, 1992) :

- Le temps d'irrigation est égal à 2 ou 3 fois le temps d'avancement ;
- Le temps d'irrigation est moins de 2 fois le temps d'avancement pour les sols perméables ;
- Le temps d'irrigation peut atteindre 6 à 7 fois le temps d'avancement sur sols limoneux desséchés.

1.6. Application et limites de l'irrigation à la raie

1.6.1. Cultures recommandées

L'irrigation à la raie convient à la plupart des cultures en lignes et particulièrement aux plantes qui ne tolèrent pas la submersion du collet de la tige; citons comme exemple: Les tomates, les légumes, la pomme de terre et l'haricot.

1.6.2. Sol

Cette méthode convient bien aux sols de texture moyenne à modérément fine, ayant une réserve utile relativement élevée et une conductivité hydraulique suffisante qui assure une bonne mobilité de l'eau, aussi bien horizontalement que verticalement. Elle convient aux sols de texture fine et peu perméables, sur des parcelles horizontales, ce qui augmente la durée de submersion.

Dans les sols de texture grossière, l'infiltration dans les raies est essentiellement verticale avec très peu de pénétration latérale. Pour de tels sols, l'irrigation à la raie est efficace si les raies sont courtes, les durées d'application faibles, les raies relativement rapprochées et les doses d'arrosage réduites.

1.7. Paramètres de performance

1.7.1. Rendement hydraulique

Un usage efficace de l'eau d'irrigation est une obligation pour chaque usager. Cependant le rendement de l'utilisation de l'eau est appliqué aux techniques de l'irrigation qualitativement. Un contrôle et un aménagement convenables de l'irrigation demandent des méthodes qui puissent estimer la valeur des techniques d'irrigation, depuis le moment où l'eau quitte le point de prise jusqu'à son utilisation par les plantes.

- Rendement du transport d'eau : Les pertes qui apparaissent pendant le transport de l'eau sont souvent excessives. Le rendement du transport de l'eau peut être formulé comme suit, équation (30):

$$EC = \frac{W_r}{W_f} \cdot 100 \quad (30) \quad \text{Israëlsen and Hansen (1965)}$$

Avec:

Ec = rendement du transport de l'eau (%);

Wr: l'eau détournée de la rivière ou du réservoir (m³);

Wf : l'eau fournie à l'exploitation agricole (m³).

- Rendement de l'application de l'eau : Le rendement d'application de l'eau ou rendement hydraulique a été établi pour mesurer et attirer l'attention sur l'efficacité avec laquelle l'eau appliquée a été accumulée dans la zone des racines du sol. C'est le rapport entre la dose nette et la dose brute, il est exprimé en pourcentage et donné par la formule suivante (31):

$$Rh(\%) = \frac{dn}{db} \cdot 100 \quad (31) \quad \text{Israëlsen and Hansen (1965)}$$

Avec:

Rh: rendement hydraulique (%);

db : dose brute (mm);

dn = dose nette (mm) .

Au cas où la dose nette n'est pas assurée en tous les points c'est-à-dire que la dose infiltrée est inférieure à la dose nette on applique la formule suivante (32):

$$Rh\% = \frac{di}{db} \times 100 \quad (32) \quad \text{(Berthomé, 1987)}$$

di : dose infiltrée (mm) .

En irrigation traditionnelle bien maîtrisée, le Rh peut atteindre les valeurs comprises entre 60 à 70%, en irrigation modernisée il peut dépasser les 80% et l'uniformité peut aussi dépasser 80% (Cemagref, 1992).

Cependant dans une application normale de l'irrigation, les rendements sont d'environ 60% dans l'irrigation de surface (Israëlsen and Hansen, 1965).

1.7.2. Coefficient d'uniformité (Cu)

Pour que l'apport d'eau satisfasse les besoins des cultures avec une uniformité

acceptable, l'eau doit séjourner en chaque point, pendant une durée minimale qui correspond à l'infiltration de la dose nette. Cette répartition est représentée par un rendement de répartition ou coefficient de répartition C_u établi par Christiansen (1942).

$$C_u = 1 - \frac{[\sum(V_x - V_f)]}{N \times V_f} \quad (33)$$

$$V_f = \frac{V_{app}}{EL} \quad (34)$$

Avec :

V_x : volume d'eau apporté au point x (mm) ;

V_f : volume d'eau moyen infiltré (mm) ;

N : nombre de points " x ;

V_{app} : volume d'eau total apporté dans la raie (mm) ;

E : écartement de raie (m) ;

L : longueur de raie (m) ;

Dans le cas où la valeur du C_u est inférieure à 0,5, l'uniformité d'arrosage est mauvaise et dans le cas contraire elle est bonne. L'uniformité d'arrosage est donnée par la relation suivante (35) (Cemagref ,1992):

$$L'uniformité = \frac{dn}{di} \quad (35)$$

D'après Kruse et al (1983) on a pu mesurer sur une parcelle irriguée à la raie, une amélioration du rendement hydraulique (passant de 65% à 92%) due à l'amélioration de l'uniformité d'arrosage.

1.8. Dose d'irrigation

1.8.1. Dose brute

La dose brute est la quantité totale apportée sur la parcelle par unité de surface, cette quantité n'est pas totalement utilisable par la culture (Fig. 2).

$$db = \frac{\text{volume brute}}{\text{surface irriguée}} = \frac{\text{duré} \times \text{débit}}{\text{surface}} = \frac{60 \cdot Q \cdot t}{L \cdot E} \quad (36)$$

Avec :

Q : débit en tête de raie ($l s^{-1}$) ;

t : temps d'application du débit (mn) ;

L : longueur de raie (m) ;

E : écartement de raie (m) ;

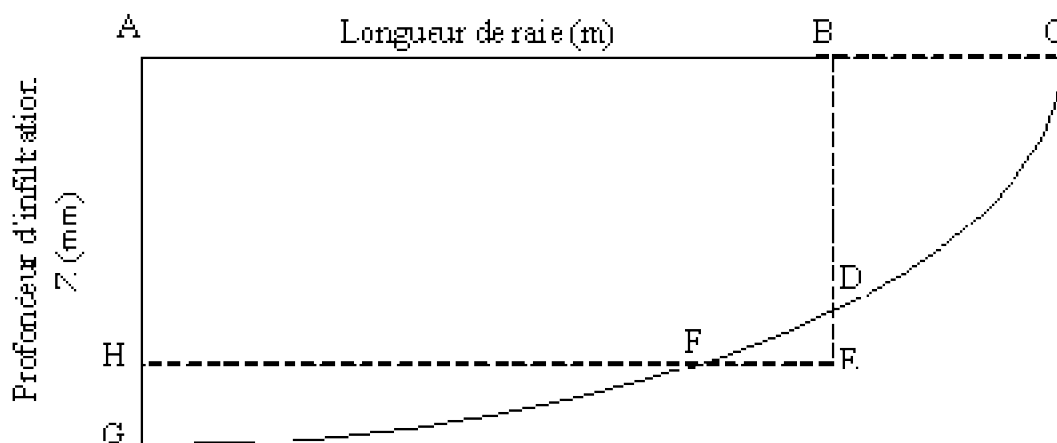


Figure 2: Profil idéal d'une irrigation à la raie (Thoma & Wayne, 1998).

Z : Profondeur d'infiltration (mm) ;

AB : Longueur de la raie (m) :

ACDGA : Volume total appliqué = dose brute (mm) ;

ABDEHA : Dose nette (mm) ;

ABDFHA : Volume stocké disponible au niveau de la zone racinaire (mm) ;

FGHF : Volume perdu par percolation (mm) ;

BCDB : Volume perdu en colature (mm) ;

DEFD : Déficit hydrique après irrigation (mm).

1.8.2. Dose nette

Elle représente la quantité d'eau à apporter par unité de longueur et unité de largeur pour un sol donné, elle est donnée par la relation suivante (37) :

$$d_n = 0,3 D_a H_e Z \quad (37) \text{ Ducrocq (1987)}$$

Avec:

D_a : densité apparente ;

H_e : humidité équivalente (%) ;

Z : profondeur d'enracinement (mm) ;

La dose nette est égale aussi à la dose brute diminuée des pertes par percolation et en colature (Cemagref, 1992).

Elle est déduite de la formule établie par le SCS (38):

$$dn = \left[e^{\log(T \cdot a)} + c \right] \frac{P_m}{E} \quad (38)$$

dn : dose nette d'arrosage (mm) ;

T : durée d'apport (mn) ;

P_m : périmètre mouillé (m) ;

E : écartement des raies (m) ;

a, b et c : coefficients de l'infiltration .

1.9. Avantages et inconvénients de l'irrigation à la raie

1.9.1. Les principaux avantages de l'irrigation à la raie

Parmi les avantages de l'irrigation à la raie on peut citer (Poiree et Olier, 1971):

- frais réduits d'aménagement de terrain ;
- terrain accessible en tous temps pour les travaux, les sillons seuls étant en eau ;
- sol sans tassement notable ; pas de formation de croûte superficielle, pas de danger d'érosion du sol ;
- feuillage des plantes qui n'est pas mouillé, ce qui évite certaines maladies ;
- système convenant particulièrement aux plantes et aux arbres fruitiers

1.9.2. Les inconvénients de l'irrigation à la raie

L'irrigation à la raie présente les inconvénients suivant (Poiree et Ollier ,1971):

- la lenteur de l'arrosage ;
- la gêne causée par les sillons pour les déplacements latéraux ;
- les besoins importants de main-d'œuvre ;
- les pertes d'eau très importantes, notamment lorsque les sillons ont une longueur importante.

1.10. Conclusion

Une grande différence entre la technique d'irrigation à la raie selon la formulation proposée par la littérature et la technique pratiquée en Algérie. En irrigation à la raie, la main d'eau est distribuée sur plusieurs raies longues (la pente du terrain est corrigée par un nivellement) en même temps, les eaux de colature sont récupérées ce qui améliore

l'efficience de la technique. En Algérie, la technique d'irrigation à la raie est pratiquée sur des raies courtes qui reçoivent individuellement la main d'eau et elle est conduite sur des raies bouchées avec des pertes de 30%. Elle reste la plus dominante malgré qu'elle sollicite une main d'œuvre importante et un travail pénible.

En irrigation à la raie, l'alimentation des cultures est assurée par infiltration, ce qui nous amène à connaître les lois qui régissent l'infiltration.

Chapitre II. L'infiltration

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les facteurs qui influent sur l'infiltration, sa redistribution dans un profil après irrigation, la méthode de mesure de l'infiltration verticale par double anneau de Muntz et les lois qui régissent le processus d'infiltration et son estimation.

2.1. Généralités

L'infiltration est le processus d'entrée de l'eau dans le sol. Ce processus a une grande importance dans la détermination du régime de ruissellement de l'eau. L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface et quelle fraction va alimenter le sol par infiltration et participer à la recharge des nappes souterraines ?

2.2. Définition

Par définition, l'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol et verticalement vers le bas. Lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion.

On admet que dans la zone humectée, le phénomène obéit à la loi de Darcy, à la limite entre la zone humectée et la zone sèche se développent des forces capillaires qui vont contribuer au gradient hydraulique (Courou, 1969).

2.3. Description du processus

L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion. D'après Hillel (1984), si la surface du sol est arrosée ou alimentée en eau à un régime constamment croissant, tôt ou tard l'alimentation dépassera la capacité d'adsorption en eau du sol et l'excès d'eau s'accumulera en flaques à la surface du sol ou ruissellera le long de la

pente.

Afin d'appréhender le processus d'infiltration, il faut connaître :

2.3.1 Régime d'infiltration

Le régime d'infiltration $i(t)$ est exprimé en mm/h, nommé aussi le taux d'infiltration. Il désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface, dépend avant tout du régime d'alimentation (pluie ou irrigation), mais également des propriétés du sol (Musy et Soutter, 1991).

Le régime d'infiltration dépend de la capacité d'infiltration et du régime d'alimentation. Au début du processus de l'infiltration, l'eau s'infiltré aussi vite qu'elle est fournie. L'apport d'eau est inférieur à la capacité d'infiltration dans le cas, ou le régime d'infiltration est déterminé par le régime d'alimentation. Dans le cas où l'apport est égal à la capacité d'infiltration, le régime d'alimentation est proche de la conductivité à saturation K_s (Fig.3). Par contre, quand l'apport est supérieur à la capacité d'infiltration du sol, l'eau cesse de s'infiltrer et l'excédent s'accumule en surface ou ruisselle suivant la pente, dans ce cas, le régime d'infiltration est limité par la capacité d'infiltration du sol.

Au départ, l'eau s'infiltré rapidement (taux d'infiltration initial), au fur et à mesure que l'eau remplit les pores, le taux d'infiltration diminue jusqu'à une valeur pratiquement constante appelée taux d'infiltration à régime stabilisé. Le taux d'infiltration est fonction de la texture du sol, il est élevé pour la texture grossière et faible pour la texture fine (tableau 3).

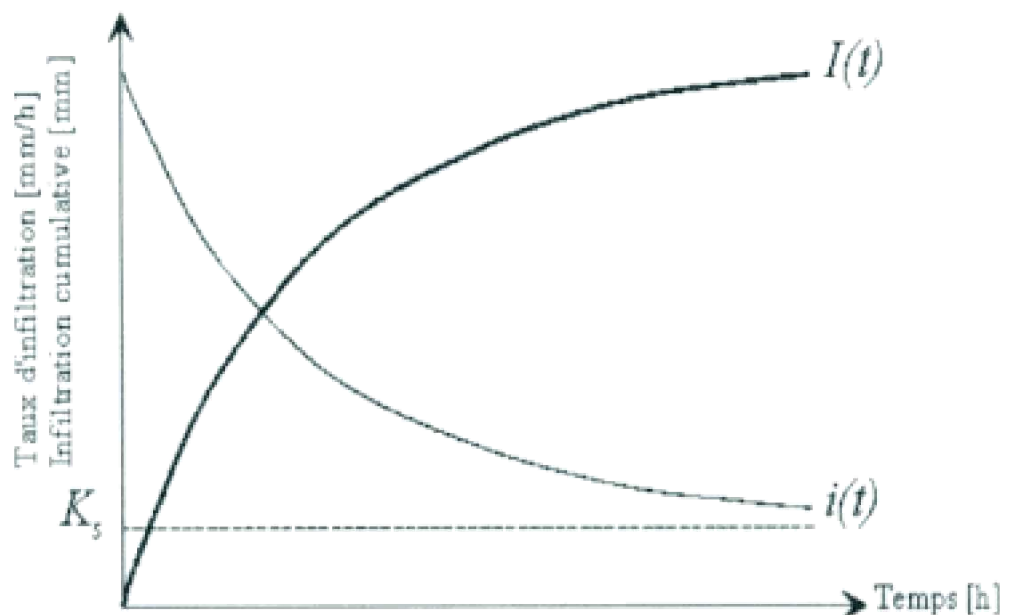


Figure 3 : Evolution générale du régime d'infiltration cumulative au cours du temps (Musy et Soutter, 1991)

2.3.2. Capacité d'infiltration

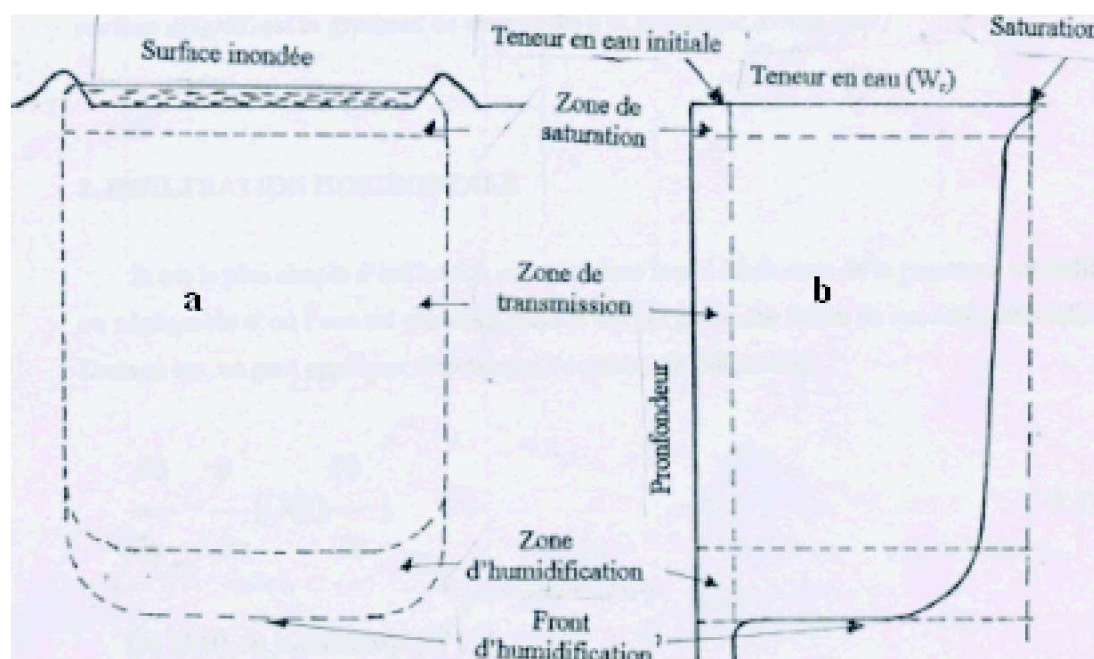
La capacité d'infiltration ou capacité d'absorption ou encore infiltrabilité du sol, est le flux maximal que le sol peut absorber à travers sa surface maintenue en contact avec l'eau à la pression atmosphérique (Hillel, 1984). L'infiltrabilité du sol et sa variation dans le temps dépendent de la conductivité hydraulique, la texture et la structure du sol, mais également des conditions de l'humidité (la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface).

Elle est élevée au début de l'infiltration et en particulier quand le sol est initialement sec, mais tend à décroître d'une façon monotone et s'approche à la longue d'une manière asymptotique d'un régime constant appelé infiltrabilité stabilisée.

2.4. Distribution de l'eau dans le profil du sol lors de l'infiltration.

Le profil hydrique représente la distribution verticale des teneurs en eau dans le sol, à différents instants donnés ; en examinant le profil d'humidité d'un sol homogène et lorsque sa surface est submergée, le profil hydrique présente trois zones qui sont alors bien distinguées pendant l'infiltration (Fig. 4) :

- Une zone superficielle ou zone de saturation qui s'approche de la surface du sol ;
- Une zone de transmission presque saturée et qui s'allonge continuellement ;
- Une zone d'humectation qui se caractérise par une teneur en eau fortement décroissante avec la profondeur. Le front d'humectation se déplace vers le bas, ce qui délimite le sol humide du sol sec sous-jacent.



2.5. Facteurs influençant l'infiltration

L'infiltration est conditionnée par les principaux facteurs ci-dessous :

2.5.1. Type de sol

Les caractéristiques de la matrice du sol (structure, texture et porosité) influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration.

2.5.2. Compacité de la surface du sol

Elle est due à l'impact des gouttes de pluie (battance) ou à d'autres effets (thermiques et anthropiques). L'utilisation de lourdes machines agricoles dans les champs, peut par exemple avoir pour conséquence, la dégradation de la structure de la couche de surface du sol et la formation d'une croûte dense et imperméable à une certaine profondeur (sensible au labour). Le tableau 3 montre à titre d'exemple les différentes évolutions du régime d'infiltration au cours du temps selon le type de sol.

2.5.3. Couverture du sol

La végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'autre part, le système racinaire améliore la perméabilité du sol. Enfin, le feuillage protège le sol de l'impact de la pluie et diminue par voie de conséquence le phénomène de battance.

2.5.4. Topographie et morphologie

La pente par exemple agit à l'opposé de la végétation. En effet, une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration.

2.5.5. Débit d'alimentation (intensité de la précipitation, débit d'irrigation).

Lorsque l'intensité de la pluie ou de l'arrosage dépasse le régime d'infiltration du sol, le processus d'infiltration est le même que dans le cas d'un sol légèrement inondé (Hillel, 1984).

2.5.6. Teneur en eau initiale du sol (conditions antécédentes d'humidité)

L'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol. Le régime d'infiltration au cours du temps évolue différemment selon que le sol est initialement sec ou humide. Les expériences réalisées avec un matériau poreux montrent que l'infiltration d'une pluie non saturante est la plus rapide avec l'humidité initiale la plus élevée (Clouet et al, 1972).

Le même chercheur a montré que, la profondeur d'infiltration est influencée positivement par l'humidité initiale ; son expérience a prouvé qu'à chaque instant, le

traceur est d'autant plus loin de son point de départ que le sol est initialement plus humide

2.6. Infiltration horizontale

Le cas le plus simple d'infiltration est celui dans lequel l'influence de la pesanteur est nulle ou négligeable, et où l'eau est entraînée dans le sol par les seules forces de succion matricielle.

2.7. Infiltration verticale et profondeur maximale mouillée.

2.7.1. Profondeur mouillée

Selon Vilain (1987), la profondeur maximale mouillée (P_m) dépend de l'état hydrique initial, de la capacité de rétention (H_{cc}) et de la hauteur d'eau infiltrée (I), elle est donnée par la relation suivante (40) :

$$P_m = \frac{I}{H_{cc} D_a} \quad (40)$$

- P_m : profondeur mouillée (mm) ;
- H_{cc} : humidité à la capacité au champ (%) ;
- D_a : densité apparente () ;
- I : hauteur d'eau infiltrée (mm) ;

Lorsque le sol au moment de l'apport n'est pas totalement sec, la détermination de la profondeur mouillée est un peu plus difficile, il faut connaître l'état hydrique en fonction de la profondeur. La progression de l'eau en fonction du temps lors d'un mouvement d'infiltration dépend de l'état de la surface du sol, de son état structural et du débit d'apport (Fig. 5).

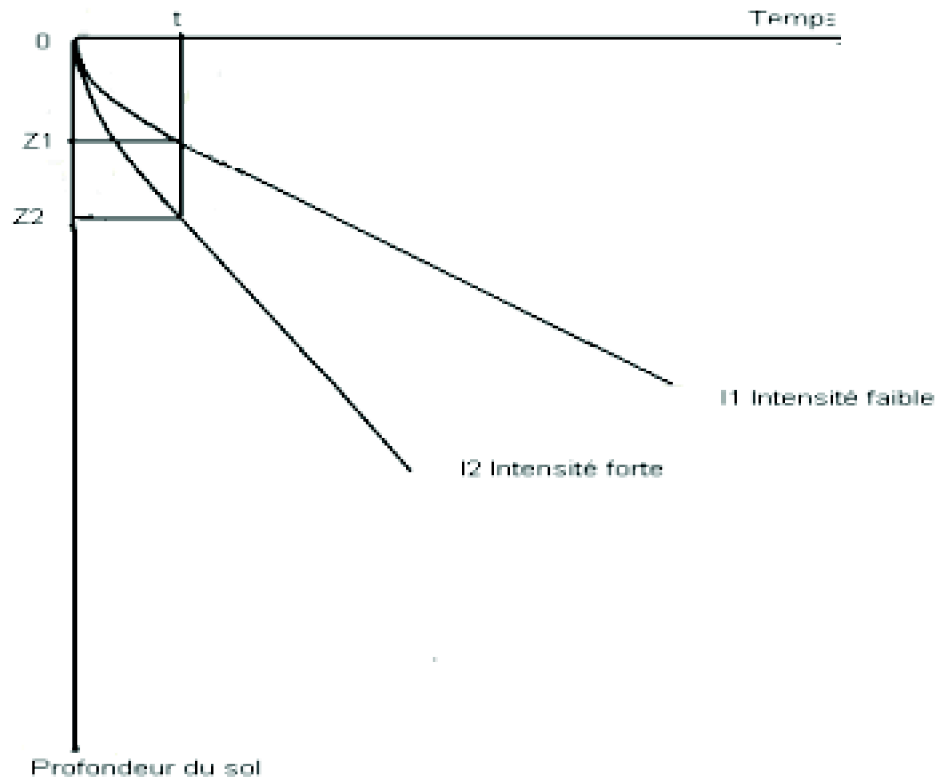


Figure 5 : Variation de la profondeur mouillée en fonction du temps (Vilain, 1987)

Z1 et Z2 : profondeurs mouillées, Sont respectivement les profondeurs atteintes par les débits Q2 et Q1 avec $Q2 > Q1$;

La figure 5, montre que pour atteindre Z1, le débit fort (Q2) met moins de temps que le débit faible (Q1) , la vitesse de descente est d'autant plus élevée que l'intensité de la pluie est forte.

2.7.2. Infiltration verticale

L'infiltration verticale se fait vers le bas dans un sol initialement non saturé, elle est en général due à l'influence combinée des gradients de succion et de gravité. Au fur et à mesure que l'eau pénètre profondément et que la partie mouillée du profil s'allonge, le gradient moyen de succion diminue. Cette tendance continue jusqu'à ce que le gradient de succion dans la partie supérieure du profil devienne négligeable, laissant le gradient gravitationnel (constant) comme force motrice entraînant l'eau vers le bas dans la zone de transmission (Hillel, 1984)

2.8. Caractéristiques de l'infiltration

2.8.1. Taux d'infiltration

Le taux d'infiltration exprime la capacité ou la vitesse à laquelle l'eau entre dans le sol à

travers la surface. Il exprime généralement la hauteur d'eau (mm) qui s'infiltré dans le sol en une heure. Un taux d'infiltration de 13 mm/h (tableau 3) veut dire qu'une colonne d'eau de 13 mm de hauteur s'infiltré complètement dans le sol à travers la surface au bout d'une heure.

Au départ l'eau s'infiltré rapidement, c'est ce qu'on appelle le taux d'infiltration initial. Au fur et à mesure que l'eau remplit les poches d'air du sol, le taux d'infiltration de l'eau décroît et atteint éventuellement une valeur pratiquement constante. C'est ce qu'on appelle le taux d'infiltration en régime permanent.

Tableau 3: Taux d'infiltration en régime permanent pour différents types de sol (Israelsen and Hansen, 1965)

Type de sol	Taux d'infiltration en régime stabilisé (cm h ⁻¹)
Sable	2,5 - 25
Glaise sableuse	1,3 – 7,6
Glaise	0,8 - 2
Glaise argileuse	0,25 – 1,5
Argile limoneuse	0,3 – 0,5
Argile	0,01 – 0,1

Le taux d'infiltration est fonction de la texture (granulométrie ou dimensions des particules) et de la structure du sol (arrangement ou disposition des particules). Le taux d'infiltration est un bon étalon pour le classement des sols du point de vue de l'aptitude à l'irrigation. La méthode de mesure la plus courante du taux d'infiltration est celle de l'infiltromètre à double cylindre ou à double anneau de Muntz (photo 1).

2.8.2. Mesure in situ de l'infiltration

Méthode

1ère étape: On enfonce le cylindre de 30 cm de diamètre dans le sol, jusqu'à une profondeur de 15 cm au moins. On tient le cylindre vertical, et on enfonce une règle dans le sol de façon à garder une hauteur libre de 12 cm au dessus du sol.

2ème étape: On enfonce le cylindre de 60 cm de diamètre dans le sol, ou bien on fait une levée de terre autour du cylindre de 30 cm de diamètre, d'une hauteur égale à celle du cylindre, et on verse l'eau.

3ème étape: On commence par verser l'eau dans le cylindre intérieur (diamètre de 30 cm) jusqu'à une hauteur de 70 – 100 mm. En même temps on remplit l'espace vide entre les deux cylindres, ou bien entre le cylindre intérieur et la levée de terre, jusqu'à la même hauteur. Ces deux opérations doivent être rapides et simultanées. Le remplissage de l'eau entre les deux cylindres, ou bien entre le cylindre intérieur et la levée de terre, a pour but d'empêcher les fuites d'eau latérales en dehors des limites de l'infiltromètre.

4ème étape: On enregistre les cotes des eaux par lecture de la règle graduée et on déclenche le chronomètre, ou bien on note le temps.

5^{ème} étape : Au bout de 1 à 2 minutes, on enregistre la baisse de la cote d'eau et on rétabli le niveau d'eau dans le cylindre intérieur. On remplit d'eau l'espace extérieur limité entre les deux cylindres à la nouvelle cote des eaux dans le cylindre intérieur.

6^{ème} étape : On répète le processus jusqu'à ce que la baisse de cote des eaux soit la même au bout du même intervalle de temps. Au départ les lectures des côtes sont faites à des intervalles de temps courts (toutes les 1 à 2 minutes), puis au fur et à mesure que l'infiltration se ralenti, les lectures seront faites à des intervalles de temps plus longs (toutes les 20 à 30 minutes).

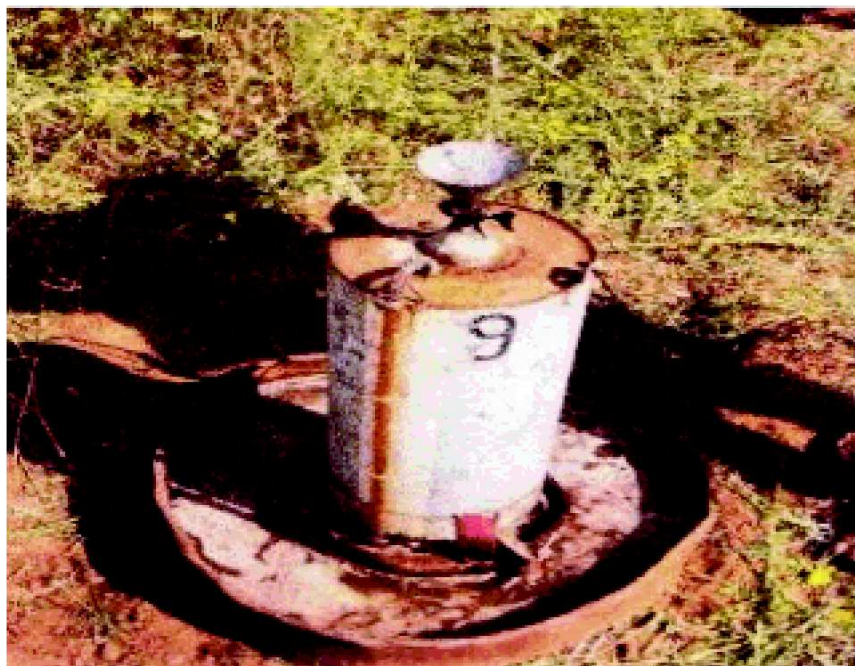


Photo 1 : Double anneau de Muntz

2.9. Notion de redistribution

2.9.1. Généralités

Lorsque l'irrigation s'arrête et l'alimentation est terminée (pas d'eau à la surface du sol), le mouvement de l'eau en profondeur ne cesse pas immédiatement dans le profil. Ce phénomène est appelé la redistribution (Fig.6). Dans certains cas, le régime de redistribution décroît rapidement et après plusieurs jours la partie mouillée du sol semble se maintenir à sa teneur en eau. Dans d'autre cas, le régime de redistribution peut demeurer important, tout en diminuant pendant de nombreux jours voir même des semaines. L'importance de ce processus est la détermination de la quantité d'eau retenue à des moments différents dans les diverses couches de profil.

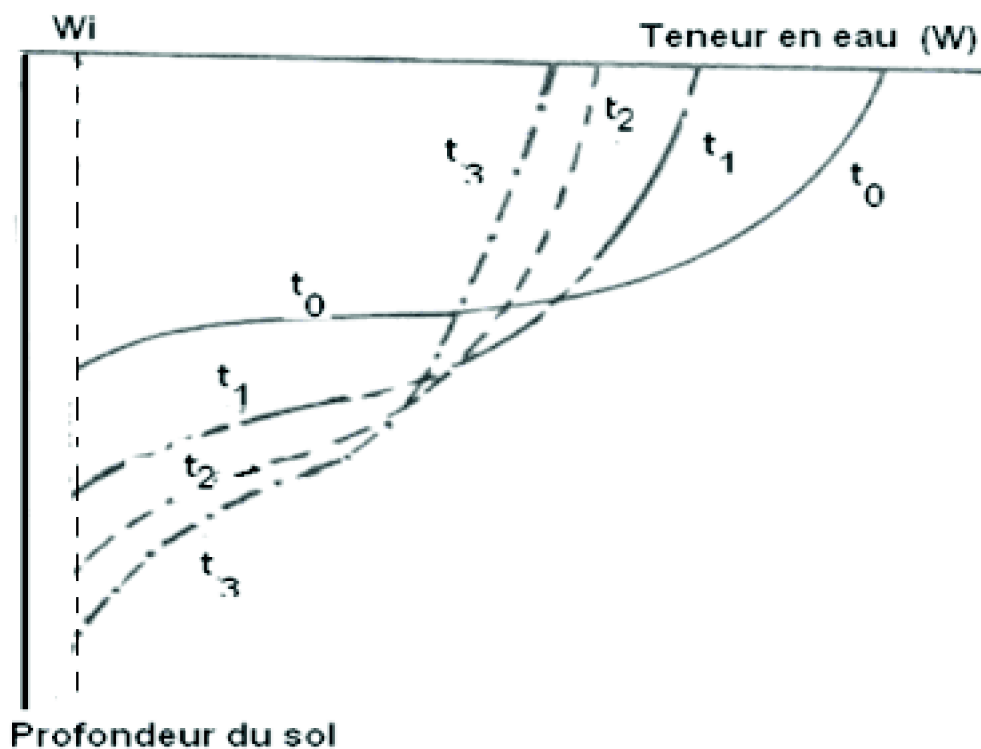


Figure 6 : Evolution des profils de teneur en eau dans un sol à texture moyenne au cours d'une redistribution suivant une irrigation (Hillel, 1984)

Les courbes t_0 , t_1 , t_2 , et t_3 représentent les profils 0 ; 1 ; 4 et 14 jours après la fin de l'irrigation.

W_1 : La valeur de la teneur en eau avant l'irrigation ;

W : La valeur de la teneur en eau après l'irrigation ;

2.9.2. Redistribution de l'humidité du sol suite à une infiltration

La texture du sol joue un rôle très important dans la rétention de l'eau, les sols argileux retiennent mieux l'eau que les sols sableux (Fig. 7).

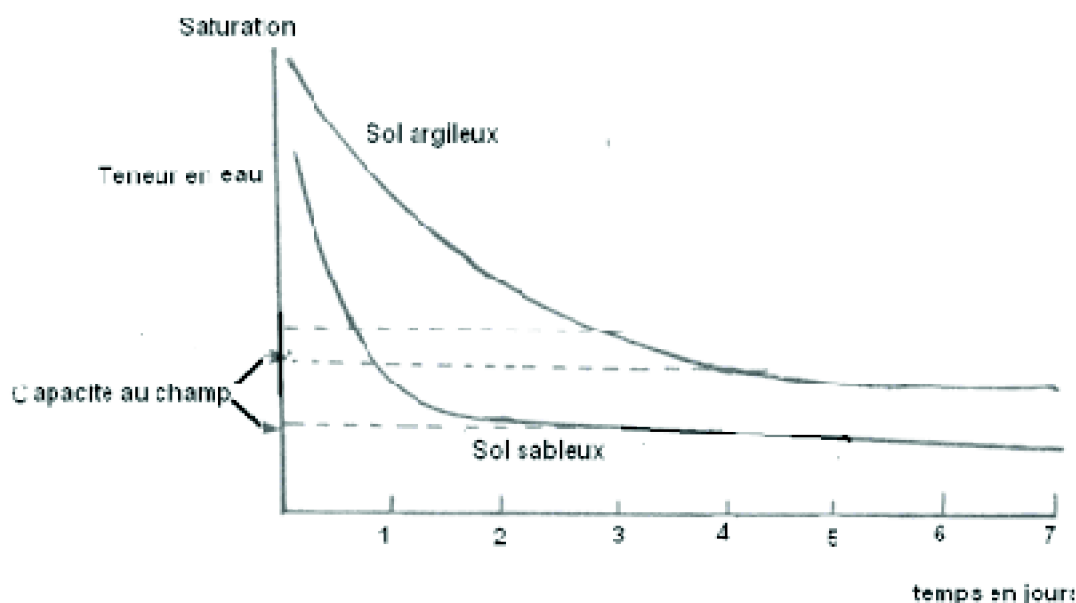


Figure 7 : Diminution monotonique de la teneur en eau en fonction du temps dans la zone initialement humidifiée au cours de la redistribution (Hillel, 1984).

2.9.3. Influence de l'infiltration sur la migration des éléments en profondeur

Au cours de leur infiltration dans le sol, les pluies ont pour effet secondaire de mobiliser et entraîner en profondeur des corps susceptibles d'être mis en solution ou en suspension. Lorsqu'il s'agit d'engrais solubles tels que les nitrates, cet entraînement appauvrit en éléments fertilisants ces couches de sol occupées par les racines et conduit à des pertes improductives (Clouet., 1970 ; Libois ,1968 ; Feodoroff et. Meriaux ,1972).

Ils ont montrés aussi que les modalités de l'entraînement sont influencées par les conditions climatiques, notamment par le rythme des pluies et l'état de dessèchement des sols.

2.10. Lois d'infiltrations

2.10.1. Introduction

La plupart des relations qui décrivent les caractéristiques de l'infiltration d'un sol jusqu'à présent sont empiriques, cela est dû à la complexité des solutions analytiques du problème de variabilité spatiale et temporaire de l'infiltration et en partie de leur application difficile dans le modelage de l'irrigation de surface.

2.10.2. Caractéristiques d'absorption des sols

Dans toutes les méthodes d'irrigation, sauf la sub-irrigation, l'eau est appliquée sur la surface de la terre où elle pénètre ensuite et où elle est emmagasinée pour que les plantes l'utilisent ultérieurement. Le rythme de pénétration de l'eau dans le sol selon les

conditions du terrain, nommé la vitesse d'absorption, est d'une importance fondamentale. Un des principaux problèmes dans les exploitations irriguées est la faible vitesse d'absorption causée généralement par un ameublissement excessif du sol et par la salinité. Si l'eau ne pénètre pas dans le sol et n'y est pas emmagasinée, les plantes ne peuvent pas pousser.

La vitesse de filtration dépend de nombreux facteurs y compris la hauteur de l'eau à la surface, la température de l'eau et du sol, de la texture (tableau 3), la structure et la teneur en humidité du sol. La configuration de surface comme la forme et la taille des rigoles aussi bien que la méthode d'application soit également des facteurs importants. Habituellement la vitesse de filtration relevée en fonction du temps sur une échelle semi-logarithmiques se présentera comme une ligne droite et peut être par conséquent représentée par l'équation :

$$I = a \cdot t^n \quad (41)$$

Si l'observation de la filtration s'étend sur de longues périodes, on peut obtenir habituellement une meilleure représentation des données en utilisant l'équation (42) :

$$I = a \cdot t^n + b \quad (42)$$

Etant donné que n est négatif, I diminue avec une augmentation de t , par conséquent, la vitesse de filtration I s'approchera d'une valeur constante b à mesure que le temps augmente. En général la filtration approche d'une vitesse constante, appelée vitesse de filtration finale (Fig .8).

Il faut observer certaines précautions dans l'utilisation des vitesses finales pour un programme d'irrigation, quand on utilise des irrigations plus fréquentes et plus faibles, celles-ci peuvent être terminées avant que la vitesse de filtration finale soit atteinte. Etant donné que les vitesses initiales sont considérablement plus fortes que les vitesses finales. La quantité d'eau ayant pénétrée dans le sol peut être représentée d'une meilleure façon par la profondeur accumulée d'eau qui a pénétrée dans le sol (figure 8) .Cette équation est l'intégrale de la filtration (43) (Israelsen &Hansen, 1965)

$$Z = \int I dt = \frac{a}{n+1} t^{n+1} = ct^n \quad (43)$$

Ou une deuxième fonction qui représente plus exactement la profondeur d'eau accumulée (44).

$$Z = \frac{a}{n+1} t^{n+1} + bt \quad (44)$$

Z: Infiltration accumulée (mm) ;

t : Temps d'application de l'irrigation (mn) ;

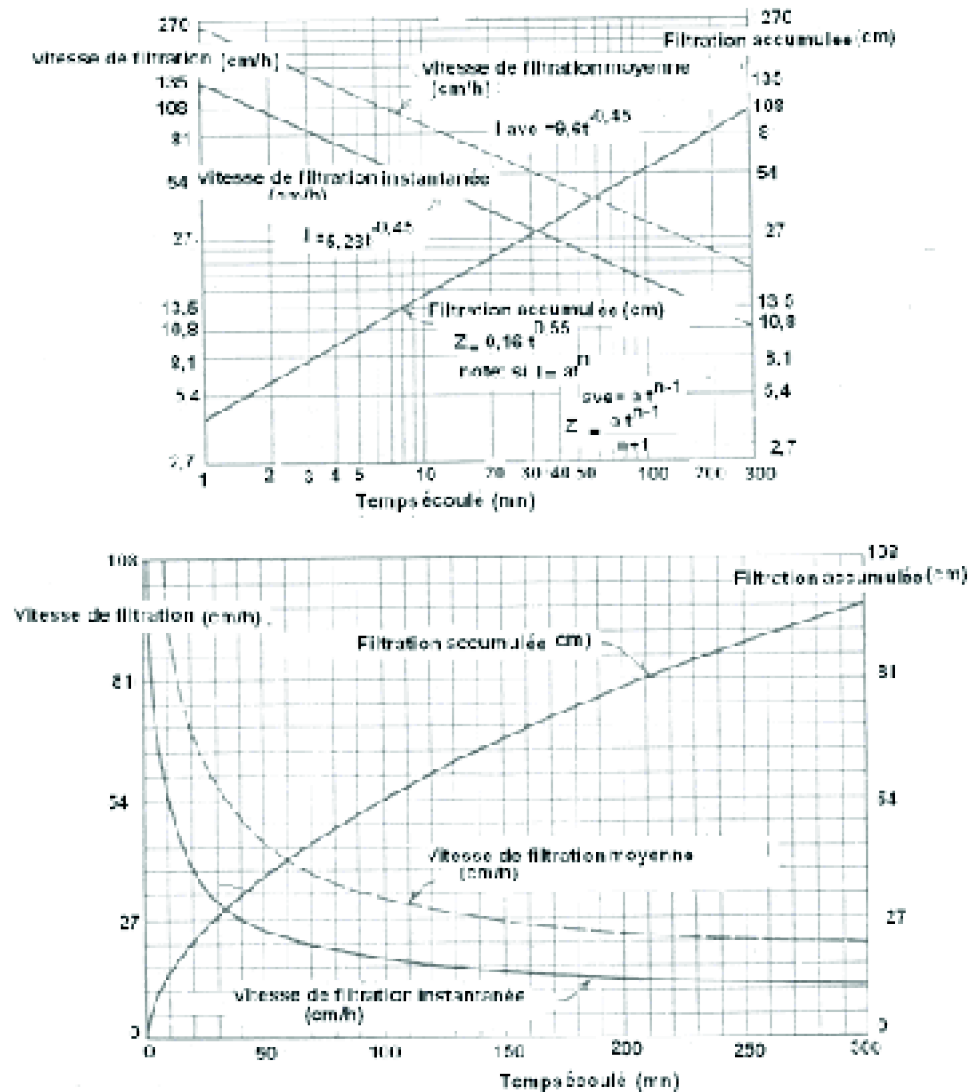


Figure 8 : Les courbe typiques de filtration (Israelsen and Hansen; 1965)

2.10.3. Lois d'infiltration

Plusieurs lois ont été proposés pour l'estimation de l'infiltration entre autres on peut citer

- Loi de Kostiakov

La loi de Kostiakov est simple, l'infiltration cumulée est une fonction puissance de la forme (45) :

$$I = a \cdot t^b \quad (45)$$

a et b ; Constantes empiriques qui dépendent de la texture du sol ;

I : Infiltration cumulée (l/m) ;

t : Temps de séjour de l'eau à la surface du sol (mn) ;

Cette loi ne tient pas compte de l'humidité initiale du sol, dont dépend l'infiltration. L'utilisation du double anneau de Muntz, modifie l'espace poreux, ce qui influe considérablement sur les propriétés conductrices du sol ; à cet effet Kostiakov a modifiée son équation (45).

- Loi de Kostiakov modifiée

$$I = a \cdot t^b + C \cdot T \quad (46)$$

Où c représente l'infiltration stabilisée (l/m .mn).

- Loi de Philip

La résolution de Philip est une forme d'une série de puissance (47):

$$Z(0, f) = \sum F_n(t) \cdot t^{\frac{n}{2}} = F_1 \cdot t^{\frac{1}{2}} + F_2 \cdot t + F_3 \cdot t^{\frac{3}{2}} + \dots \quad (47)$$

Avec :

z : la profondeur a une valeur donnée de la teneur en eau ;

$F_n(t)$: sont des coefficients calculés à partir des fonctions de la conductivité et de la diffusivité.

La résolution de Philip décrit aussi la relation entre le temps et l'infiltration cumulative sous forme d'une série de puissance (48 et49) :

$$I(t) = \sum J_n \cdot t^{\frac{n}{2}} = S \cdot t^{\frac{1}{2}} + A_2 \cdot t + A_3 \cdot t^{\frac{3}{2}} + \dots \quad (48)$$

Elle est de la forme

$$I = S \cdot t^{\frac{1}{2}} + A \cdot t \quad (49)$$

S est la sorptivité du sol (l/m mn^{1/2}) ;

A est la transmissivité (l/m mn) ;

D'après Hillel (1984) la sorptivité a été décrite par Philip (1969) :

$$S = \frac{I}{t^{\frac{1}{2}}} \quad (50)$$

En infiltration horizontale le deuxième terme de l'équation (49) est nul et l'équation

devient (51) :

$$I = S \cdot \sqrt{t} \quad (51)$$

Pour les temps très faibles, le premier terme de l'équation (49) est supérieur au second (52) :

$$S\sqrt{t} > A \cdot t \quad (52)$$

Ceci montre que pour les temps les plus faibles, la force motrice de l'infiltration est le gradient de succion ; par contre, pour les temps les plus élevés le second membre est supérieur, ce qui met en évidence que pour les temps élevés, le potentiel gravitationnel devient plus important.

Loi du SCS (Soil Conservation Service)

Le principe retenu par le SCS est le classement des sols en groupes d'infiltration (figure 10), l'équation générale de l'infiltration est la suivante (53):

$$F_n = a \cdot t^b + c \quad (53)$$

Où F_n est l'infiltration cumulée (mm), t est le temps pendant lequel l'eau est en contact avec le sol (mn), les constantes a , b et c sont des coefficients dépendants de la texture du sol (tableau 4).

Le choix d'un groupe d'infiltration approprié (figure 9) dépend non seulement du sol, mais aussi de la méthode d'irrigation. Le choix ne peut s'opérer qu'à partir d'essais d'irrigation ; en irrigation à la raie on procède à un essai d'infiltration sur un tronçon de raie de 1,5 m de longueur, les valeurs de l'infiltration cumulée sont reportées à la figure 9 et on choisit le groupe d'infiltration qui se rapproche le plus de nos valeurs.

Tableau 4. Les coefficients a, b et c des groupes d'infiltrations (USDA ; 1979)

Groupe d'infiltration	b	c	f	g . 10 ⁻⁴
0,05	0,5334	0,618	7,0	7,16
0,10	0,6198	0,661	7,0	7,25
0,15	0,7110	0,683	7,0	7,34
0,20	0,7272	0,699	7,0	7,43
0,25	0,8534	0,711	7,0	7,52
0,30	0,9248	0,720	7,0	7,61
0,35	0,9957	0,729	7,0	7,70
0,40	1,064	0,736	7,0	7,79
0,45	1,130	0,742	7,0	7,88
0,50	1,196	0,748	7,0	7,97
0,60	1,321	0,757	7,0	8,15
0,70	1,443	0,766	7,0	8,23
0,80	1,560	0,773	7,0	8,50
0,90	1,674	0,779	7,0	8,68
1,00	1,786	0,785	7,0	8,86
1,50	2,284	0,799	7,0	9,76
2,00	2,753	0,808	7,0	10,63

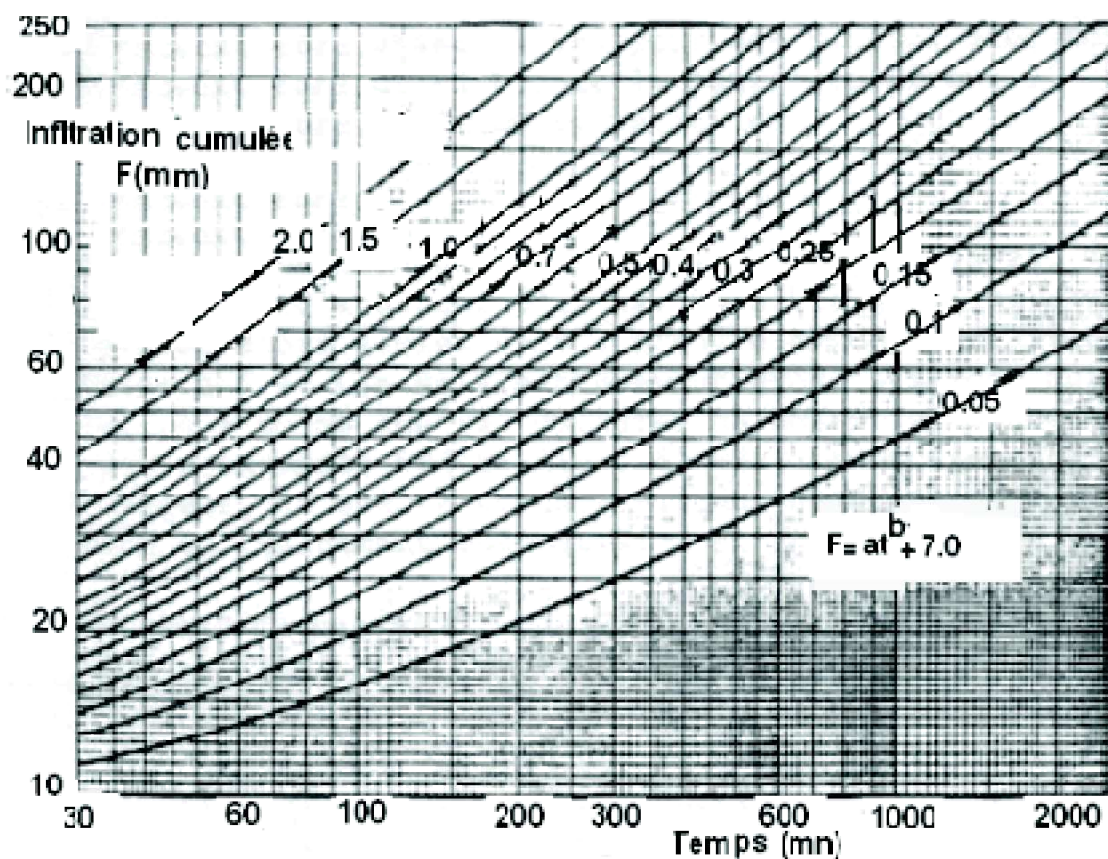


Figure 9 : Groupe d'infiltration (USDA ; 1979).

Méthode de Green et Ampt

L'hypothèse principale de cette méthode est que le front d'humidification est bien net et distinct, la succion matricielle au niveau de ce front reste pratiquement constante quelque soit le temps et la position (54) :

$$I = K \cdot t + (H_0 - H_f) \cdot L_f \ln[1 + L_f (H_0 - H_f)] \quad (54)$$

I est l'infiltration cumulée (mm), H_0 et H_f sont respectivement les pressions à la surface d'entrée et au niveau du front d'humidification, L_f est la distance entre la surface et le front, k est la conductivité hydraulique de la zone de transmission.

2.11. Conclusion

Le profil d'infiltration est constitué de trois zones bien distinctes (saturation, transmission et humectation), l'infiltration est influencée par le débit d'alimentation, la texture du sol, les conditions antécédentes du sol (humidité du sol) la végétation, la compacité et la pente du terrain ainsi que de la géométrie du périmètre mouillé de la raie et de la charge d'eau. L'infiltration influe sur la migration des éléments solubles tel que les nitrates et par conséquent appauvrit les couches occupées par les racines des plantes. Plusieurs lois ont été évoquées pour estimer la lame d'eau infiltrée ce qui nécessite un modèle pour leur élaboration.

Chapitre III. Le modèle du bilan des volumes

Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'approche hydrodynamique, l'approche du bilan des volumes, les différents modèles hydrauliques appliqués pour estimer l'infiltration, les composantes et les techniques du modèle retenu (le bilan des volumes).

3.1. Généralités

Il existe plusieurs modèles permettant de caractériser l'infiltration à partir des données de l'arrosage. Toutes ces approches se basent sur le principe de la conservation de masse et de l'énergie (de la quantité de mouvement) mais varient dans leur traitement de la quantité de mouvement. L'approche pour résoudre le problème du temps d'avancement en irrigation de surface se base sur deux modèles principaux :

3.1.1. Approche hydrodynamique

Elle est basée sur les équations de masse et de l'énergie qui sont en relation avec la profondeur et la vitesse d'écoulement à ciel ouvert. La solution de ces équations de St

–Venant est beaucoup plus complexe malgré le recours à la solution numérique (Kruger et Bassette ; 1965 in Diarra, 1999).

3.1.2. Approche du bilan des volumes

Elle est basée sur le principe de conservation de masse. Dans cette approche, la profondeur moyenne est obtenue par des mesures du terrain ou estimée par l'équation de quantité de mouvement pour établir le profil de surface (Hall, 1956, Davis, 1961, Fok et Bishop ; 1965, Wilke et Smerdon, 1965, Hart et al ,1968 in Diarra ,1999).

3.2. Modèles hydrauliques

3.2.1. Modèle hydrodynamique

Les équations (55 ; 56) de St Venant décrivent l'écoulement varié en irrigation de surface (Karmelli et al ,1975 in Diarra ,1999).

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + BV \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (55)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f + \frac{V}{2g} A \frac{\partial z}{\partial t} \quad (56)$$

- A : Aire de la section mouillée de l'écoulement ;
- B : Largeur au sommet de l'écoulement ;
- g : Pesanteur ;
- z : Infiltration par unité de longueur de la raie ;
- S_0 : Pente du fond de la raie ;
- S_f : Pente hydraulique d'énergie ;
- V : Vitesse moyenne de l'écoulement à une distance x ;
- X : Distance le long de la raie ;
- Y : Profondeur de l'écoulement ;
- t : Temps d'écoulement ;

La première équation est développée en considérant la conservation de masse et la deuxième est développée à partir de la quantité de mouvement ou de l'énergie.

3.2.2. The kinematique wave model

Dans l'approche cinématique, nous supposons que l'unique relation qui existe, décrit le débit comme étant une fonction du tirant d'eau. Ce modèle a été proposé initialement à des fins purement hydrologiques par Light Hill et Witham (1955) cité par Berthomé (1987).

Ce modèle a été introduit en irrigation gravitaire vers les années soixante dix, en supposant que la fonction puissance décrit efficacement la relation existante entre la hauteur hydraulique et les caractéristiques de la raie.

L'illustration de cette relation se fait par les équations suivantes (57 et 58):

$$Y = \gamma_1 \cdot A^{\gamma_2} \quad (57)$$

$$A^2 \cdot R^{1.33} = \delta_1 \cdot A^{\delta_2} \quad (58)$$

- Y : Charge d'eau dans la raie (m) ;
- A : La section de la raie (m²) ;
- R : Rayon hydraulique (m) ;
- $\delta_1, \delta_2, \gamma_1$ et γ_2 : Constantes empiriques ;

L'équation cinématique traduisant la continuité de masse s'écrit de la manière suivante (59):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (59)$$

Z : Infiltration cumulée ;

$\partial Z / \partial t$: Taux d'infiltration dans la raie ;

La résolution de cette équation se base sur l'équation de Kostiakov – Lewis (Kostiakov modifiée) pour décrire le taux d'infiltration.

3.2.3. The zero inertia model

La première opération du modèle inertie nulle pour le processus complet de l'irrigation a été faite par Strelkoff et Catapodes (1977) cité par Berthomé (1987) et elle reste toujours valable. Les équations utilisées sont linéaires et pour une précision maximale de cette linéarisation, après résolution par une transformation logarithmique, ces équations sont regroupées sous forme de matrice pour faciliter leur exploitation.

3.2.4. Le modèle du bilan des volumes

Le modèle du bilan des volumes a été décrit pour la première fois par Lewis et Milne (1938) cité par Berthomé (1987) pour la phase d'avancement de l'irrigation de surface.

Si le comportement de l'infiltration du sol peut être précisément estimé, les systèmes d'irrigation peuvent être étudiés et opérés de façon à utiliser l'eau et les ressources d'énergies plus efficacement. Vu la variabilité spatiale et temporaire de l'infiltration et le grand nombre de facteurs qui peuvent l'influencer, l'estimation de ces caractéristiques est rendue difficile. C'est ainsi, que l'attention des chercheurs est orientée plus sur l'évaluation du comportement que sur son estimation. (Elliott et Eisenhower, 1983).

L'approche du bilan des volumes néglige l'équation entière et remplace le

comportement dynamique en posant des hypothèses qui sont d'un support solide dans la littérature technique et sujettes à des discussions intéressantes pour leurs validités et leurs applications. L'approche du bilan des volumes, appliquée à la phase d'avancement, utilise la conservation de masse pour donner la solution de l'infiltration. L'admission d'un débit Q_0 régulier à l'entrée de la raie, produit un avancement sur une distance x à un temps d'avancement t . Le volume d'eau entré dans la raie $Q_0 \cdot t$ est la somme du volume d'eau sur la surface du sol $V_y(t)$ et du volume infiltré $V_z(t)$ (60).

$$Q_0 \cdot t = V_y \cdot (t) + V_z \cdot (t) \quad (60)$$

Le volume d'eau à la surface du sol est déterminé par l'équation suivante (61):

$$V_y \cdot (t) = \int_0^Z A(v,t) \cdot dv \quad (61)$$

Le modèle du bilan des volumes suppose que la section moyenne A est constante, la pratique usuelle est de définir A à partir de A_0 par l'expression :

$$A = \delta_y \cdot A_0 \quad (62)$$

Où δ_y , facteur de forme de la surface d'eau, représente le rapport entre la section mouillée moyenne A et la section mouillée en tête de raie A_0

On remplace l'équation (62) dans l'équation (61), l'équation du volume d'eau de surface devient comme suit (63):

$$V_y = \delta_y \cdot A_0 \cdot X = A \cdot X \quad (63)$$

Le volume d'eau infiltré est obtenu par intégration de l'infiltration cumulée par unité de longueur, $Z(v, t)$ par rapport à la longueur d'avancement (64).

$$V_z \cdot (t) = \int_0^X Z(v,t) \cdot dv \quad (64)$$

$Z(v, t)$ dépend seulement du temps d'opportunité $(t - t_v)$ ou t_v est le temps quand le front d'avancement atteint la distance v .

La somme des volumes d'eau pendant la phase d'avancement est représentée par l'expression de Lewis Milne (1938).

$$Q_0 \cdot t = A \cdot X + \int_0^X Z(t - t_v) \cdot dv \quad (65)$$

On peut définir k , le facteur de forme du profil de l'infiltration par l'expression suivante (66) :

$$k = \frac{\int_0^x Z(t - t_p) \cdot d\nu}{Z_0 \cdot X} \quad (66)$$

Z_0 : l'infiltration cumulée en tête de la raie

L'équation (65) écrite par Lewis Milne (1938) devient comme suit :

$$Q_0 t = \delta_y \cdot A_0 + \delta_z \cdot Z_0 X \quad (67)$$

3.3. Les composantes du bilan en volume

3.3.1 Détermination des volumes infiltrés

Les volumes cumulés infiltrés se déduisent des mesures de volumes cumulés écoulés en colature et des volumes stockés en surface. Pour ce faire, on écrit l'équation du bilan en volume au temps (68).

$$V_e(t) = V_i(t) + V_s(t) + V_c(t) \quad (68)$$

V_e : Volume entré (l) ;

V_i : Volume infiltré (l) ;

V_c : Volume écoulé en colature (l) ;

V_s : Volume stocké en surface (l) ;

On déduit le volume infiltré cumulé à l'instant t , sachant que dans le cas d'une raie bouchée, à débit constant est comme suit (69)

$$V_i(t) = Q_0 \cdot t - V_s(t) \quad (69)$$

Où V_i , et V_s sont exprimés en l, Q_0 est en l/s et t en mn.

3.3.2. Détermination de la loi d'avancement

Deux lois d'avancement sont classiquement utilisées en irrigation à la raie à débit constant. La loi la plus courante est de type puissance (70).

$$x(t) = p \cdot t^r \quad (70)$$

t ; le temps d'avancement (mn) ;

x : la longueur de la raie (m) ;

Où Inversement, on a l'équation suivante (71):

$$t \cdot (x) = \alpha \cdot x^\beta \quad (71)$$

α et β : Coefficients constants fonction de p et r , le Soil Conservation Service (SCS) propose une deuxième loi du type (72) :

$$t(x) = \frac{x}{f} \cdot e^{\frac{g x}{S \sqrt{s}}} \quad (72)$$

Q : Débit d'alimentation en tête de la raie ($l \cdot s^{-1}$) ;

S : Pente de la raie (m/m) ;

g et f : Coefficients constants ;

La détermination de la loi d'avancement consiste à ajuster les mesures de terrain à une des deux lois formulées précédemment. Si l'on retient une loi de type puissance, il y a au moins trois façons de faire l'ajustement.

La plus connue est la régression log -linéaire, en effet, les équations (70) et (71) s'écrivent respectivement (73) et (74) :

$$\text{Log} x = \text{Log} p + r \text{Log} t \quad (73)$$

$$\text{Log} t = \text{Log} \alpha + \beta \text{Log} x \quad (74)$$

Le problème consiste alors à trouver la droite d'ajustement qui se rapproche le plus des couples de données ($\text{Log} x_n, \text{Log} t_n$).

La deuxième méthode est moins connue ; c'est la plus simple, elle est connue sous le nom de méthode des deux points (Elliott et Walker ; 1982 in Berthomé ; 1987). Elle consiste à résoudre le système suivant (75 et 76) :

$$\frac{L}{2} = p \cdot t_I^r \quad (75)$$

$$L = p \cdot t_I^r \quad (76)$$

Les seules données nécessaires sont les temps de passage au milieu et à l'extrémité avale de la raie (77 et 78) :

$$r = \frac{\text{Log } \frac{1}{2}}{\text{Log } \frac{t_I}{t_I}} \quad (77)$$

$$P = \frac{L}{t_I^r} \quad (78)$$

La troisième méthode est la plus précise mais difficile à mettre en œuvre. Elle consiste à rechercher les coefficients α et β qui rendent minimum l'écart type entre les temps observés et les temps calculés par l'équation (71). Cela se formalise comme suit (79 et 80) :

$$\text{Min}_{(\alpha, \beta)} \Gamma_N(\alpha, \beta) \quad (79)$$

$$\Gamma_N(\alpha, \beta) = \left[\frac{1}{N} \sum (t_n - \alpha \cdot x_n^\beta) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (80)$$

Où Γ_N représente l'écart type et N le nombre de points de mesures. Le programme informatique mis en œuvre utilise la méthode de tolérance flexible (Himmelblau ; 1972 in Berthomé 1987). Il s'agit en fait d'un programme très général permettant de trouver le minimum d'une fonction non linéaire, soumise à des contraintes non linéaires. Sans utilisation des dérivées des différentes fonctions entrant en ligne de compte (Ezezer et Berthomé, 1985).

L'utilisation de la dernière méthode est très abusive pour la détermination de la loi d'avancement. On peut juger la validité des trois méthodes par l'écart type Γ_N .

La troisième méthode est évidemment meilleure que les deux précédentes et la deuxième méthode est meilleure que la première, une étude conduite sur un plus grand nombre d'essais a montré que c'était généralement le cas (Elliott et Walker, 1982).

3.3.3. La récession

On peut négliger la phase de récession si le volume infiltré correspondant est faible par rapport au volume infiltré pendant la totalité de l'arrosage. De même, plus la pente est forte, plus faible est la durée de la phase de récession. Certains auteurs, entre autres Elliott et Eisenhower (1982) cités par Berthomé (1987), proposent une loi de type puissance pour caractériser la récession (81).

$$x = c \cdot t_r^\alpha = c \cdot (t_{rI} - t_{co})^\alpha \quad (81)$$

t_r : représente le temps (mn) écoulé après l'arrêt de l'alimentation en tête

correspondant à l'arrivée du front de récessivité ,à l'abscisse $x(m)$.

c et α : des coefficients d'ajustement .

3.3.4. Volume entré

Le volume entré constitue une partie importante du bilan de volume, il représente le volume d'eau total de l'arrosage. Ce volume peut être déterminé par l'intermédiaire de l'hydrogramme des débits entrés (82).

$$V_e = 60 \cdot Q_{app} \cdot t_{app} \quad (82)$$

3.3.5. Volume ruisselé

Dans le cas d'une raie ouverte, le volume d'eau ruisselé doit être inclus. Les procédés de mesures de débit sont utilisés pour déterminer le volume ruisselé à la sortie de la raie. Les volumes ruisselés se calculent de la façon suivante (83) :

$$V_r(t_i) = V_r(t_{i-1}) + \frac{1}{2} [Q_r(t_{i-1}) + Q_r(t_i)](t_i - t_{i-1}) \quad (83)$$

3.3.6. Volume stocké

Le calcul du stockage superficiel s'effectue à partir des mesures de sections de raie et de hauteurs d'eau au niveau des différentes sections prises en compte. Si la raie est homogène, il suffit de déterminer la forme d'une section moyenne pour déterminer le volume stocké, l peut être estimée à partir des équations suivantes (84) :

$$V_s(t) = 10^3 \cdot \sigma_v \cdot A_0 \cdot x \quad (84) \text{ (Walker et Skogerboe, 1984)}$$

V_s : Volume stocké à l'abscisse x en (l) ;

σ_v : Facteur correcteur de forme du volume stocké en surface varie entre 0,70 et 0,80 ,on retient généralement la valeur 0,77 ;

A_0 : Section mouillée en tête de raie (m^2) ;

La valeur de A_0 est déduite de la formule de Manning – Strikler (85):

$$Q = \frac{A_0 10^3}{n} \cdot \left(\frac{A_0}{Pm}\right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{S} \quad (85)$$

Où n représente le coefficient de Manning quivarie entre 0,02 pour une raie déjà irriguée à surface libre et 0,04 pour un sol fraîchement labouré ; 0,015 lorsqu'une végétation dense freine le mouvement de l'eau (Walker et SKogerboe, 1984 in Berthomé ,1985).

- Q : Débit en tête de raie ($l\ s^{-1}$) ;
- P_m : Périmètre mouillé (m) ;
- S : Pente de la raie (m/m) ;

Une autre formule qui estime le stockage superficiel est donnée par le SCS (ASAE, 1983 in Berthomé 1984) (86) :

$$V_s = \frac{x}{0,305} \left[\left(2,947 \cdot \frac{Q \cdot x}{\sqrt{S}} \right)^{0,753} - 0,0217 \right] \quad (86)$$

3.4. Techniques du bilan des volumes

Les différentes méthodes numériques utilisées (la méthode récursive et la méthode de la transformée de la place) se basent sur l'approche du bilan des volumes et représentées par l'équation (65) de Lewis Milne.

Philip et Farrell (1964) ont utilisé la transformée de Laplace pour développer l'équation (65).

La vitesse d'avancement est décrite par l'équation (70) et après dérivation (87) :

$$\text{On a: } ds = p \cdot r \cdot t^{r-1} dt \quad (87)$$

L'équation de Lewis- Milne (1938) pour l'irrigation par planche s'écrit (88) :

$$Q \cdot t_x = yx + \int_0^{tx} Z(tx-ts) \cdot ds \quad (88)$$

Pour décrire l'infiltration l'équation devient (89) :

$$Q \cdot tx = Ax + prw \cdot \int_0^{tx} Z(tx-ts)^{r-1} dt \quad (89)$$

3.4.1. Méthode de Reddell (1981)

Cette technique suppose que le volume de la nappe peut être négligé. Présenté par Philip et Farrell (1964) in Berthomé (1987), la solution de l'équation (89) est comme suit (90) :

$$\frac{x}{Q} = L^{-1} \frac{1}{S^3 \cdot L\{Z\}} \quad (90)$$

S : l'opérateur de Laplace ;

L {z} : transformée de Laplace ;

L^{-1} : est la fonction inverse de L {z} ;

Pour résoudre l'équation (90), on suppose que l'infiltration obéit à la loi de Kostiakov et la solution est donnée par l'équation (91).

$$\frac{Q}{x(t)} = k \cdot \Gamma \cdot (1+a) \cdot \Gamma \cdot (2-a) \cdot t^{a-1} \quad (91)$$

Où $\Gamma ()$ désigne la fonction Γ .

En remplaçant x (t) par sa valeur dans l'équation (70) on obtient (92) :

$$a = 1 - r \quad (92)$$

$$k = \frac{Q}{P} \cdot \Gamma \cdot (1+a) \cdot \Gamma \cdot (2-a) \quad (93)$$

3.4.2. Méthode de Elliott et Walker (1982) méthode des deux points

Elle est analogue à la méthode des deux points utilisée pour calculer les coefficients de la loi d'avancement.

Elle part de la formule approchée de Christiansen et al. (1966) pour estimer la valeur de l'intégrale dans l'équation (65), sachant que la loi d'infiltration retenue est la loi de Kostiakov modifiée, ce qui donne (Elliott et Walker ,1982) (94) :

$$V(t) = F \cdot k \frac{t^a}{a+1} + C \frac{t}{r+1} \quad (94)$$

Ou r, k, a et c sont des coefficients des lois d'avancement et d'infiltration (95).

$$Z \cdot (t) = K \cdot t^a + ct \quad (95)$$

F est le facteur correctif de Kiefer, estimé par la formule (96) :

$$F = \frac{a+r-a^r+1}{r+1} \quad (96)$$

Le coefficient r est déterminé par la méthode des deux points appliquée à la loi d'avancement. Quant à C , on suppose que l'infiltration instantanée stabilisée est atteinte en fin d'arrosage, d'où (97) :

$$C = \frac{60 \cdot (Q - Q_c)}{L} \quad (97)$$

Q_0 ($l s^{-1}$) représente le débit d'alimentation ;

Q_C ($l s^{-1}$) e débit de ruissellement en colature en fin d'arrosage ;

L (m) la longueur de la raie ;

C peut donc se calculer à partir des mesures de débit. Il reste à déterminer k et a . Pour ce faire, on écrit l'équation (94) pour $t_{L/2}$ et t_L , c'est à dire au cours de la phase d'avancement, lorsque le front atteint les abscisses $L/2$ et L .

D'où le système de deux équations a deux inconnues k et a (98 et 99):

$$\frac{V_L}{L} = F \cdot K \frac{t_L^a}{a+1} + C \cdot \frac{t_L}{r+1} \quad (98)$$

$$\frac{V_{L/2}}{L/2} = F \cdot K \cdot \frac{t_{L/2}^a}{a+1} + C \frac{t_{L/2}}{r+1} \quad (99)$$

Ou V_L et $V_{L/2}$ sont les volumes infiltrés observés aux temps t_L et $t_{L/2}$

Les valeurs de k et a se calculent des quatre équations suivantes (100, 101,102 et 103) déduites des équations (98) et (99).

$$a = \frac{\text{Log } \frac{\alpha}{\beta}}{\text{Log } \frac{t_I}{t_I^{\frac{1}{2}}}} \quad (100)$$

$$K = \frac{\alpha \cdot (a+1) \cdot (r+1)}{a+r-\alpha r+1} \cdot t_I^{-a} \quad (101)$$

$$\alpha = \frac{V_I}{L} - C \frac{t_I}{r+1} \quad (102)$$

$$\beta = \frac{V_I^{\frac{1}{2}}}{L} - C \frac{t_I^{\frac{1}{2}}}{r+1} \quad (103)$$

3.5. Conclusion

L'approche hydrodynamique utilise les énergies mises en jeu pour élaborer ces modèles et ces équations, par contre l'approche hydrologique utilise la conservation de masse et néglige les énergies mises en jeu pour estimer la profondeur de la lame d'eau infiltrée dans le sol. Les composantes du bilan des volumes déterminent les volumes infiltrés et les techniques du bilan des volumes déterminent la loi d'infiltration par la phase d'avancement.

Conclusion

Les propriétés physiques du sol influent beaucoup sur l'état hydrique du sol et sont en relation directe sur la capacité de stockage de l'eau dans le réservoir du sol. La technique d'irrigation à la raie selon la formulation proposée par la littérature diffère de la technique pratiquée en Algérie. En irrigation à la raie, la main d'eau est répartie sur plusieurs raies longues en même temps, les eaux de colature sont récupérées, la modernisation de cette technique réduit la pénibilité et l'importance de la main d'œuvre. En Algérie, la technique d'irrigation à la raie est pratiquée sur des raies courtes qui reçoivent individuellement la main d'eau, elle est conduite sur des raies bouchées avec des pertes de plus de 30%, elle reste dominante malgré qu'elle sollicite une main d'œuvre importante et un travail pénible.

En irrigation à la raie, l'eau ruisselle de l'amont à l'aval et s'infiltré dans le sol,

l'infiltration est influencée par la texture du sol, les conditions antécédentes du sol (humidité du sol) la végétation, la texture du sol, la compacité et la pente du terrain ainsi que la géométrie du périmètre mouillé de la raie et le tirant d'eau. Plusieurs lois ont été évoquées pour estimer la lame d'eau infiltrée ce qui nécessite des modèles hydrauliques pour leur élaboration. Le modèle du bilan des volumes est le modèle choisi, vu sa simplicité dans son application sur terrain. Ce modèle utilise l'approche hydrologique (conservation de masse) et suppose que l'inertie et l'énergie de quantité de mouvement mises en jeu sont négligeables. L'élaboration de ce modèle sur terrain, est en fonction du bilan des volumes (volume entré = volume infiltré + volume stocké + volume de colature) et la loi d'avancement dans le but de déduire l'efficience de l'arrosage à la parcelle.

Partie expérimentale

Chapitre I. Etude du milieu

1.1. Présentation du milieu

Le site expérimental choisi se situe dans la ferme pilote Kaid Ameer de la daïra de Matmar à 10 kilomètres du chef lieu de la wilaya de Relizane (Photo. 2).

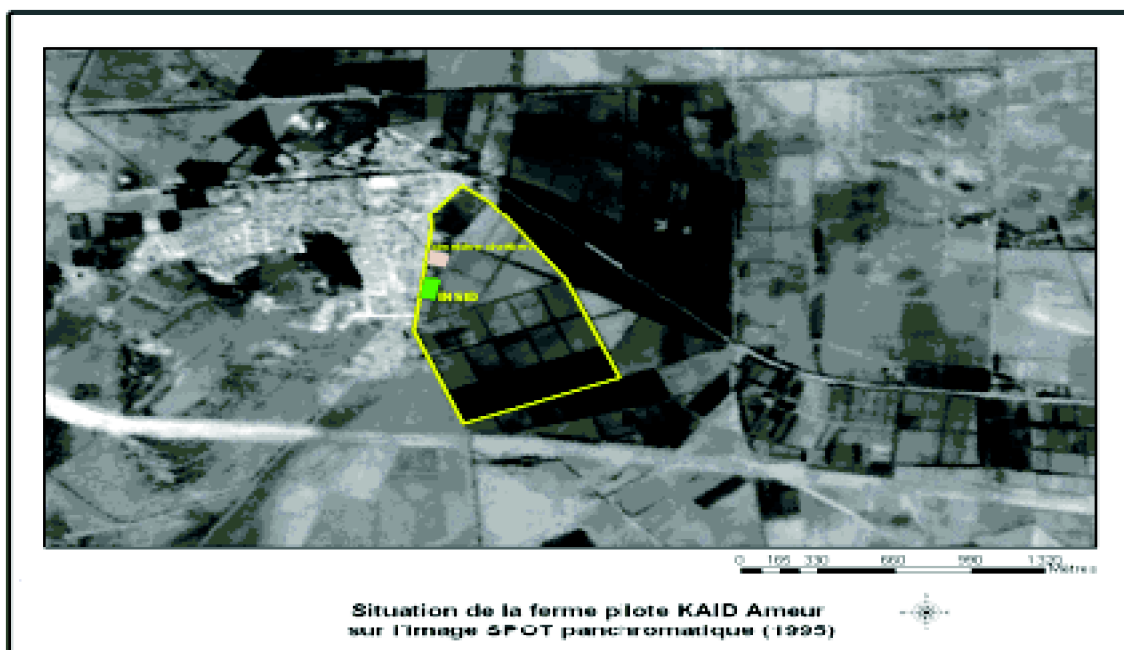


Photo 2 : Carte de situation de la ferme pilote Kaid Ameer N 3-4 Carte d'Algérie 1/25000 type 1960)

Les terres de la ferme sont en totalité situées dans le territoire de la daïra de Matmar, une partie de sa superficie (44 ha) est située à la sortie de Matmar, sur la route d'Oran, le reste (74 ha) est situé sur la route de Sidi M'hamed Benouda.

La ferme est située sur la rive gauche de la plaine de la Mina, celle-ci se trouve en générale, à une altitude de 83 mètres (Fig. .10).

Les coordonnées de la parcelle relevées par le GPS (global positioning system) sont respectivement de:

À l'amont : altitude 83, latitude 35°43'29,6 et longitude 0°28'3,3

À l'aval : altitude 83, latitude 35°43'30,5 et longitude 0° 28'5,3.

1.2. Etude climatique

1.2.1.' Indice d'aridité de Demartone

Demartone (1923) a permis de préciser le climat d'une région en évaluant un indice donné par la formule suivante (104):

$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (104)$$

- I : l'indice d'aridité
- P : précipitation annuelle (mm)

- T : température moyenne annuelle (°C)
- Si $7,5 < I < 10$, le climat est steppique
- Si $10 < I < 30$, le climat est semi aride
- Si $30 < I < 50$, le climat est tempéré

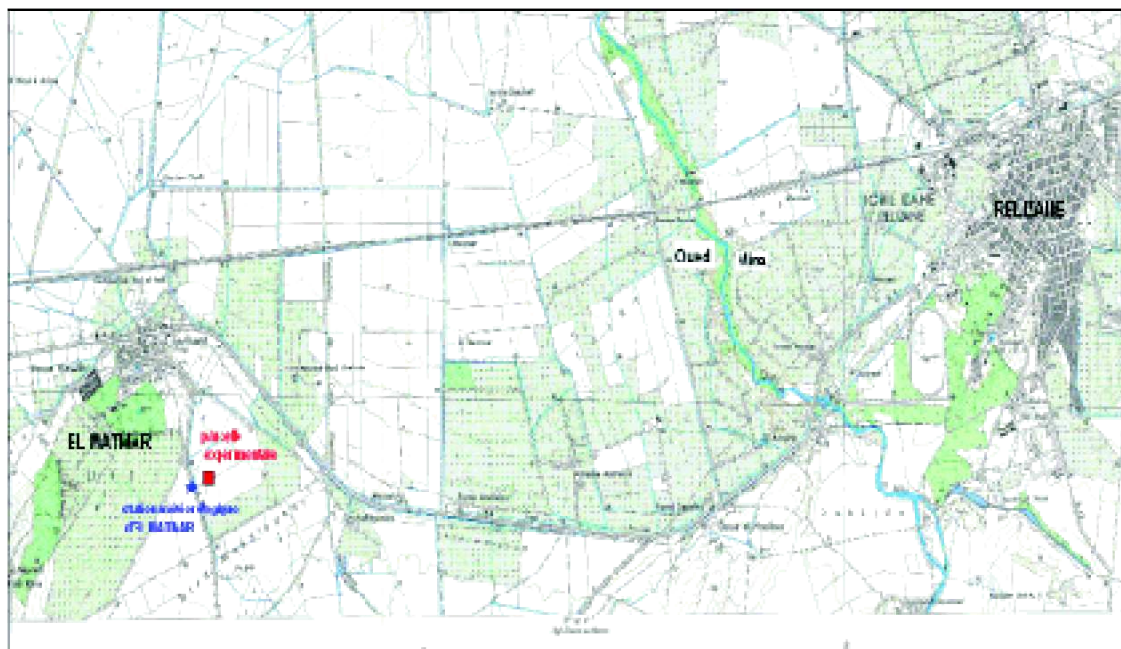


Figure 10 : Carte de situation de la parcelle sur carte topographique Relizane

$P = 286,5$ mm et $T = 18,14$ °C, en appliquant cette formule, la valeur trouvée est de $I = 10,18$

L'indice d'aridité confirme bien que la région de notre étude est semi aride

1.2.2. Critère de Bagnouls et Gausson

Ce paramètre s'applique surtout aux climats qui comportent une saison sèche assez accusée en considérant que celle-ci représente un facteur écologique défavorable à la végétation. D'après Bagnouls et Gausson un mois sec est celui où la précipitation (mm) est inférieure ou égale au double de la température moyenne (°C).

$$\text{Soit } P < 2 T \text{ et } T = \frac{M + m}{2} \quad (105)$$

P : précipitation moyenne mensuelle (mm)

T : température moyenne mensuelle (°C)

Le digramme ombro-thermique de la station de Relizane (Fig.11) détermine :

Une période sèche de sept mois, qui s'étale du mois d'avril au mois d'octobre.

Une période humide de cinq mois, qui s'étale du mois d'octobre au mois d'avril

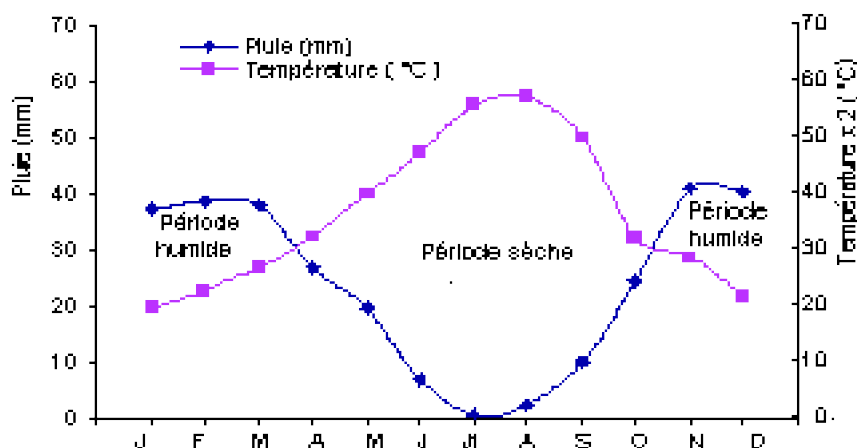


Figure 11 : Diagramme ombro-thermique de la station de Relizane

1.2.3. Précipitations

Les observations des précipitations mensuelles consignées dans le tableau 5 sont enregistrées sur une période de 25 ans par la station de Relizane (code 01461, altitude 80, latitude 35,73, longitude 0,61, période de service 1965).

Tableau 5 : Répartition des pluies mensuelles (1978-2003)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Pluie (mm)	37,2	38,6	38,1	26,9	19,7	6,8	0,8	2,5	10,0	24,5	40,9	40,5	286,5

Source : ONM Oran (2006)

Les données du tableau 5 montrent que les pluies enregistrées entre les mois de juin et septembre représentent 18,1% des pluies annuelles. Par contre, entre les mois de novembre et mars sont enregistrées 65,65% des pluies annuelles.

1.2.4. Températures

Les observations des températures moyennes mensuelles consignées dans le tableau 6 sont enregistrées sur une période de 25 ans par la station de Relizane.

L'examen des résultats montre qu'il y a un écart de 19°C entre le mois le plus chaud (août) et le mois le plus froid (janvier).

Tableau 6 : Température moyenne mensuelle (1978-2003)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Moy. Annuelle
T (°C)	9,8	11,3	13,4	16,2	20,0	23,6	27,9	28,7	25,0	16,1	14,5	10,8	18,1

Source : ANRH Oran

L'examen des résultats montre qu'il y a un écart de 19°C entre le mois le plus chaud (août) et le mois le plus froid (janvier).

1.2.5. Humidité relative

Les observations relevées dans la station de Relizane sur une période de 25 ans sont enregistrées dans le tableau 7

Tableau 7 : L'humidité relative mensuelle (1978-2003)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Moy. Annuelle
H (%)	76	73	68	58	57	51	51	51	54	62	68	73	62

Source : ONM Oran

Les humidités relatives mensuelles sont supérieures ou égales à 51% avec une moyenne annuelle de 62%.

1.2.6. Insolation

Les valeurs de l'insolation sont enregistrées dans le tableau 8 et sont relevées à la station de Relizane.

Tableau 8 : La durée d'insolation (1978-2003)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Moy. Annuelle
I (h j ⁻¹)	3,3	3,6	5,2	5,9	7,3	9,4	9,7	8,5	6,7	4,9	3,8	2,9	5,9

Source : ANM Oran

Le maximum d'insolation est enregistré au mois de juillet avec 9,7 h j⁻¹ et le minimum au mois de janvier avec 2,9 h j⁻¹. La durée moyenne d'insolation est de 5,9 h j⁻¹.

1.2.7. Evapotranspiration de référence

Les valeurs de L'évapotranspiration ET_0 sont calculées par la méthode de Penman-Monteith par le biais du logiciel Cropwat version 5.0 (tableau 9)

Tableau 9 : L'évapotranspiration de référence

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Moy. Annuelle
ET_0 (mm.j ⁻¹)	1,8	2,4	3,4	4,6	5,5	6,3	7,2	7,2	5,2	4,6	2,5	2,3	4,4

L'évapotranspiration annuelle moyenne est de 4,4 mm j⁻¹ avec un maximum de 7,2

mm j⁻¹ enregistré au mois de juillet et un minimum de 1,8 mm j⁻¹ au mois de janvier

1.3. Caractéristiques du sol

1.3.1. Profil cultural

Au niveau du terrain nous avons fait un profil cultural pour connaître les différents horizons du sol, ce profil est constitué de trois horizons.

Pour chaque horizon nous avons pris un échantillon du sol pour faire les analyses physiques et chimiques en laboratoire.

1.3.2. Texture

Nous avons fait l'analyse granulométrique selon la méthode internationale de sédimentation par l'utilisation de la pipette de Robinson

Tableau 10 : Résultats d'analyse granulométrique du sol

Horizon (cm)	% A	% L.F	% L.G	% S.F	% S.G
30	16,92	26,01	14,13	20,80	22,14
20	21,31	20,40	16,55	19,66	22,08
30	25,25	17,63	19,09	18,92	19,11

Les trois horizons du profil de la parcelle expérimentale présentent un pourcentage de sable et de limon élevé. D'après le triangle texturale (Fig. 27 en annexe 1), la texture du sol est de type limono sablo argileux (1^{ier} horizon) et limono argilo sableux (2^{ieme} et 3^{ieme} horizon).

1.3.3. Densité et porosité

La détermination de la densité apparente est obtenue par la méthode des cylindres, par contre; l'analyse de la densité réelle est faite par la méthode classique du pycnomètre. La porosité est déduite de la formule suivante (106):

$$P_r = \frac{D_r - D_a}{D_r} \quad (106)$$

Tableau 11: Résultats de la densité apparente, densité réelle et porosité

Tableau 11: Résultats de la densité apparente, densité réelle et porosité

Horizon	Densité apparente	Densité réelle	Porosité (%)
1	1,20	2,39	49,79
2	1,13	2,2	48,6
3	1,22	2,28	46,5

La densité apparente du sol varie entre 1,13 et 1,20 pour les trois horizons du profil cultural, la valeur la plus faible est donnée par le deuxième horizon.

1.3.4. Humidité

1.3.4.1. Humidité pondérale

Au début de l'expérimentation, nous avons pris un échantillon de chaque horizon, ces échantillons ont été pesés et mis dans une étuve à 105°C ; après 24 h de séchage, ils ont été retirés et pesés, l'humidité du sol est déterminée par la formule (8).

Tableau 12 : Résultats de l'humidité pondérale du profil cultural

Horizon	Profondeur (cm)	Humidité (%)
1	30	5,5
2	20	8,5
3	30	11,8

Les humidités des deux premiers horizons sont inférieures aux HpF (tableau 13), le troisième horizon a une humidité légèrement supérieure à son HpF. Finalement, on en conclue que le sol est sec.

1.3.4.2. Humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement.

Le dispositif utilisé est la marmite de Richard pour mesurer la teneur en eau en fonction du pF.

Tableau 13 : Résultats des Hcc et HpF

Horizon	Hcc (%)	HpF (%)
1	27,32	13
2	21,32	11
3	20,36	9

D'après les valeurs du tableau 13, le Hcc est compris entre 20,36% et 27,32% et HpF entre 9% et 13% pour les trois horizons. La valeur de Hcc la plus élevée est donnée par le premier horizon.

1.3.5. Matière organique

La matière organique est estimée à partir de la teneur en carbone du sol, le % de M.O = 1,72% de carbone total. Elle améliore la structure du sol et donc la circulation de l'air et de l'eau dans le sol.

Le rapport C/N donne une idée sur le degré de l'évolution de la MO, ce rapport est interprété de la manière suivante Landert et Peeters (1990):

- C/N < 10 est satisfaisante ;
- 10 < C/N < 12 est assez élevé ;
- 12 < C/N < 15 est élevé ;
- 15 > C/N est très élevé ;

L'humus d'un sol est stable pour un rapport C/N voisin de 10 , les valeurs supérieures à 12 indiquent en général une mauvaise structure ou un pH très bas ou un manque d'aération ce qui entraîne une diminution de l'activité microbienne.

Tableau 14 : Résultats de la matière organique

Horizon	% MO	% C	% N	Rapport C/N
1	2,32	1,35	0,0525	25,71
2	1,79	1,04	0,0525	19,8
3	0,846	0,49	0,07	7

Les valeurs du rapport C/N portées dans le tableau 14, sont supérieures à 12 dans le premier et le deuxième horizon et inférieures à 10 dans le troisième horizon. Les deux premiers horizons ont une mauvaise structure, l'humus du troisième horizon est stable

1.3.6. Conductivité électrique et pH

Tableau 15: Conductivité électrique et pH

Horizon	CE (dm m ⁻¹)	pH
1	0,073	7,28
2	0,173	7,38
3	0,156	7,59

Les valeurs du pH déterminées par le pH mètre, sont comprises entre 7,28 et 7,59 ; le sol est légèrement alcalin.

La conductivité électrique est mesurée au laboratoire par la méthode d'extrait aqueux dilué au 1/5. On prélève 10 g de terre fine préalablement séchée et tamisée de l'échantillon du sol à analyser, auquel on ajoute 50 ml de l'eau distillée dans un récipient qu'on met dans un agitateur pendant une heure. Après on laisse reposer pour diffusion puis on le place dans le conductivimètre (conductivity méter) pour la lecture du CE. Les valeurs du CE sont comprises entre 0,073 et 0,173 dm m⁻¹

D'après la norme ISO 11265, la CE= 0,6, dm m⁻¹ le sol est peu salé.

Selon les valeurs du CE (tab 15), le sol de la parcelle expérimentale n'est pas salé.

1.4. Résultats de l'analyse de l'eau

1.4.1. Conductivité électrique

Après mesure de la conductivité électrique, nous avons obtenu le résultat suivant :

$$CE = 1,86 \text{ dm m}^{-1}$$

1.4.2. Composition chimique

Cations (méq.l ⁻¹)				Anions (méq.l ⁻¹)			
Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
3,39	0,11	3,48	7,80	12,00	0,40	4,42	0,17

Tableau 16: Composition chimique de l'eau d'irrigation

Les éléments chimiques (cations et anions) sont mesurés par un spectromètre à absorption atomique.

1.4.3. Qualité de l'eau d'irrigation

La valeur du SAR est déterminée par la formule suivante (107):

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{++} + Ca^{++}}{2}}} \quad (107)$$

Après calcul, nous avons obtenu le résultat suivant: SAR = 1,43

Après avoir déterminé les valeurs du SAR et de la conductivité électrique CE, en utilisant le diagramme de classification des eaux d'irrigation (Fig.34 en annexe 4), on trouve que cette eau est classée dans C1-S1, cette eau a une qualité excellente et de bonne aptitude pour l'irrigation.

Chapitre II. Matériels et méthodes

2.1. Dispositif expérimental

Nous avons mis en place un dispositif de suivi composé de deux blocs de raies, l'un comprenant 10 raies bouchées et l'autre 3 raies non bouchées. Ce dispositif est muni d'un réseau de colature. La longueur des raies et l'écartement entre les raies sont identiques pour les deux blocs, elles sont respectivement de 60 m et 0,75 m (Fig.12)

La pente des raies est de 0,35% et la pente du talus est de 0,62%. L'expérimentation est menée sans culture (sol nu).

L'alimentation en eau est assurée par une pompe immergée, de débit 5 l/s installée à une distance de 62 m dans un forage (altitude 83 m, latitude 35°43'28,5 et longitude 0°28'1,1) de 120 m de profondeur, la puissance du moteur est de 10 CV. L'arrivée de l'eau jusqu'à la parcelle expérimentale est assurée par une conduite d'amenée en PVC de 100 mm de diamètre et 150 m de longueur.

L'alimentation des raies est assurée par des siphons de différents diamètres.

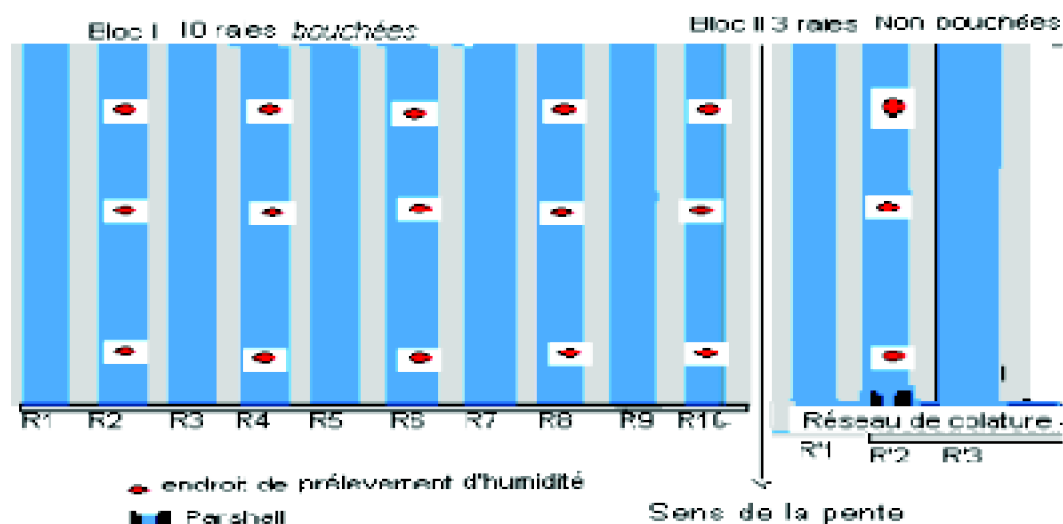


Figure 12 : Dispositif expérimental

2.2. Protocole de mesure

2.2.1. Le débit non érosif

Dans le cas de l'irrigation à la raie (raie de 40 à 90 m pour un sol filtrant et 100 à 180 m pour un sol non filtrant), le débit non érosif est déterminé en fonction de la vitesse d'écoulement dans la raie. Selon le SCS (Berthomé, 1983), la vitesse du débit non érosif doit être inférieure à $0,15 \text{ m s}^{-1}$, cette valeur peut atteindre $0,18 \text{ m s}^{-1}$.

Les débits choisis pour notre expérimentation (raie de 60 m) sont : 2 l s^{-1} , 1 l s^{-1} et $0,65 \text{ l s}^{-1}$. Ces débits ne sont pas érosifs. Avec le débit le plus fort (2 l s^{-1}) des débits proposés, l'écoulement atteint l'aval de la raie en 7,3 mn avec une vitesse d'écoulement de $0,137 \text{ m s}^{-1}$. Cette vitesse est inférieure à la vitesse indiquée par le SCS ($0,15 \text{ m s}^{-1}$).

2.2.2 Mesure du débit en tête de raie

La détermination des débits d'entrée est obtenue par l'utilisation des siphons de différents diamètres, ce qui nous a permis de jouer sur le choix du débit d'entrée par la variation du nombre de siphon mis dans la raie. Une fois l'alimentation de la première raie achevée, on procède à la suivante par les mêmes siphons jusqu'à l'achèvement de l'irrigation avec le même débit. Pour une autre irrigation avec un débit différent, on procédera de la même

manière que précédemment mais cette fois-ci avec un nombre de siphons différents.

Pour la détermination des débits de colature, on mesure les variations des hauteurs d'eau dans le parshall et le temps qui leur correspond ; ceci se fait après l'étalonnage du parshall. Pour pouvoir déduire les seuils, on effectue plusieurs manipulations des débits connus en fonction du temps et les valeurs obtenues sont ajustées suivant l'équation caractéristique du seuil jaugeur.

$$Q = a \cdot H^b \quad (108)$$

- Q: débit (l s^{-1}) ;
- H : hauteur d'eau dans le seuil (cm) ;
- Les paramètres a et b sont des constantes d'ajustement.
- Les valeurs des paramètres a et b sont respectivement 0,16 et 1,26.

2.2.3. Jalonnement des raies

Le jalon est un repère fixe placé dans la raie, il nous permet de connaître la distance parcourue par la lame liquide pendant l'avancement ainsi que la disparition de l'eau dans la raie pendant la phase de récession.

Nous avons placé avant l'arrosage, sur toute la longueur de chaque raie un jalon tous les cinq mètres.

2.2.4. Mesure du temps d'avancement :

Pendant chaque arrosage, on chronomètre le temps de passage t_n (mn) du front d'avancement au niveau de chaque jalon qui représente une abscisse x_n (m). Ceci se fait du début de l'arrosage jusqu'à l'arrivée de la lame liquide à l'aval de la raie. On observe que le front d'avancement a la forme d'une langue.

2.2.5. Mesure du temps de récession

La récession est un phénomène comparable à l'avancement, le principe de mesure est simple, il s'agit de noter le temps de disparition de l'eau au niveau des différents jalons de l'amont à l'aval de la raie. On note que la disparition du front de récession n'est pas progressive comme le front d'avancement de l'amont vers l'aval de la raie. Il existe des points bas à des abscisses intermédiaires où les flaques d'eau ne disparaissent pas. En fait, l'imprécision que l'on commet par cette appréciation subjective a beaucoup moins d'importance que pour les autres types de mesures, étant donné que pendant la récession, l'infiltration est à son plus bas niveau.

2.2.6. Mesure du stockage superficiel

Le volume stocké dans la raie se calcule à partir des mesures de la section mouillée de la

raie et des hauteurs d'eau au niveau des différentes sections prises en compte. Il y a des endroits où la section mouillée est homogène et dans d'autres elle ne l'est pas. Si la raie est homogène il suffit de déterminer la forme d'une section moyenne et si la raie présente des changements de sections notables, il faut distinguer plusieurs tronçons de raie avec des sections différentes.

Dans nos essais, nous avons pris les mesures des sections de raies et des hauteurs d'eau au niveau de chaque jalon.

Ces mesures sont faites de la façon suivante :

La section mouillée A_0 sera calculée par l'expression suivante (109) :

$$A_0 = \int_{Y_0}^{Y_n} h(Y) dY \quad (109)$$

Elle peut être déterminée par la règle du trapèze et définit comme suit (110)

$$A_0 = \frac{e}{2} (Y_0 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot Y_i) \quad (110)$$

Les points y_0, y_1, \dots, y_n sont des points de mesures de la section et qui sont équidistants d'une distance $e = 2$ cm. Pour chaque point de mesure Y_i correspond une hauteur d'eau $h_i (Y_i)$.

2.2.7. Mesure du ruissellement :

Dans le cas de la raie non bouchée, le débit en colature a été mesuré à l'aide d'un seuil jaugeur (parshall) placé à l'extrémité aval de la raie. Le début du ruissellement commence à la fin de la phase d'avancement (t_L) et s'étale jusqu'à la fin de la phase d'entretien.

Les volumes ruisselés se calculent de la façon suivante

$$Vc(t_i) = Vc(t_{i-1}) + \frac{[Qc(t_{i-1}) + Qc(t_i)](t_i - t_{i-1})}{2} \quad (111)$$

Il est suggéré que la collecte du volume ruisselé soit à 30 sec, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 mn, 30 mn et chaque demi heure (Thomas and Wayne ;1998).

2.2.8. Mesure de l'humidité

2.2.8.1. Mesure de l'humidité avant l'irrigation

La détermination de l'humidité équivalente du sol a été faite par la méthode gravimétrique. Dans l'irrigation à la raie, c'est difficile de déterminer le contenu moyen de l'eau dans un

profil du sol. De la surface à la profondeur du sol, la répartition de l'humidité du sol n'est pas identique et pendant l'irrigation il peut y avoir des mouvements latéraux considérables d'eau dans le sol. Dans tous les cas, les échantillons devraient être pris dans chaque couche du profil jusqu'à la profondeur maximale de l'enracinement de la culture (nous avons choisi une profondeur de 50 cm qui correspond à la profondeur occupée par plus de 80% du système racinaire pour les cultures maraîchères).

Le profil de notre sol présente trois horizons différents d'épaisseurs respectivement 30 cm ; 20 cm et 30 cm. Il nous suffit de rassembler des échantillons de chaque 25 cm jusqu'à 50 cm, chaque échantillon devrait être de 150 grammes ou plus. Les échantillons sont pris au niveau d'une raie sur deux, à trois positions différentes, à l'entrée de la raie (1/8 L), au milieu de la raie (1/2 L) et à la sortie de la raie (7/8 L).

2.2.8.2. Mesure d'humidité après l'irrigation

Les échantillons devraient être prélevés 24 h à 36 h après irrigation. Ce temps dépend du type de sol. Un sol drainant exige un temps de ressuyage de 24 h après irrigation. Pour le cas étudié nous avons pris les échantillons 24 h après chaque irrigation et aux mêmes endroits qu'avant irrigation.

2.2.9. Mesure de l'infiltration sur un tronçon de seguia (équivalent du double anneau de Muntz)

Le choix d'un groupe d'infiltration à partir de l'abaque USDA (1979) dépend non seulement du sol, mais de la méthode d'irrigation. A cet effet, nous avons mesuré l'infiltration verticale sur un tronçon de seguia de longueur de 1,5 m. nous l'avons rempli jusqu'à une hauteur qui correspond au tirant d'eau de 4 cm, une charge supplémentaire de 2 cm correspond à un volume de 10 litres . Les extrémités du tronçon sont fermées avec du plexiglas et à 15 cm de chaque extrémité on place un autre plexiglas.

L'opération consiste à remplir le tronçon et le vide entre les plaques externes de plexiglas de chaque extrémité jusqu'à 6 cm (niveau haut NH) et de noter le temps de descente du niveau jusqu'à 4 cm (le niveau bas NB). A chaque fois que le niveau bas est atteint, on recommence l'opération et on note le temps de descente du niveau d'eau du NH au NB. On arrête l'opération une fois qu'on s'aperçoit que l'infiltration s'est stabilisée.

2.2.10. Choix du temps d'arrosage

Le temps d'arrosage est le temps nécessaire à l'apport de la dose d'irrigation ; il correspond au temps de la phase d'avancement et au temps de la phase d'entretien. La dose d'irrigation est fixée à 31,5 mm avec une fréquence d'irrigation de 6 irrigations/ mois (tableau 42 en annexe 2). Le temps d'entretien est fixé une fois le temps d'avancement connu, il varie en fonction du débit utilisé en tête de raie.

Chapitre III. Résultats et discussions

3.1. Phase d'avancement

3.1.1. Résultats de la phase d'avancement cas d'une raie bouchée R6

Nous avons enregistré, dans les tableaux 37 ; 38 et 39 en annexe 2 l'avancement en fonction du temps d'un bloc de raies bouchées, les résultats de l'avancement sont présentés graphiquement par la courbe de la figure 13.

La dose d'irrigation est de 31,5 mm, le temps d'apport (temps d'avancement + temps d'entretien) pour les débits de 2 l s^{-1} , 1 l s^{-1} et $0,65 \text{ l s}^{-1}$ est respectivement de 11,82 mn, 23,64 mn et 36,36mn

3.1.2. Phase d'avancement : cas d'une raie non bouchée (R'2).

Dans le cas de la raie non bouchée, les résultats de l'avancement de l'écoulement en fonction du temps sont présentés graphiquement par la courbe de la figure 14 , la raie R'2 se trouve entre deux raies tampons dans le bloc II des raies non bouchées de (Fig.12).

La dose d'arrosage (31,5 mm) est appliquée en un temps équivalent aux temps d'avancement et d'entretien, elle est en fonction du débit en tête de raie. Le temps d'apport correspondant aux débits de 2 l s^{-1} , 1 l s^{-1} et $0,65 \text{ l s}^{-1}$ est respectivement de 11,82 mn, 23,64 mn et 36,36mn.

D'après les figures 13 et 14, les courbes ne sont pas linéaires elles ont la forme d'une courbe de puissance. La courbe du débit le plus fort est toujours en dessous de la courbe du débit le plus faible ; avec le débit le plus fort, l'écoulement est rapide et atteint l'aval de la raie en un temps très court. Le temps d'avancement est inversement proportionnel au débit d'alimentation.

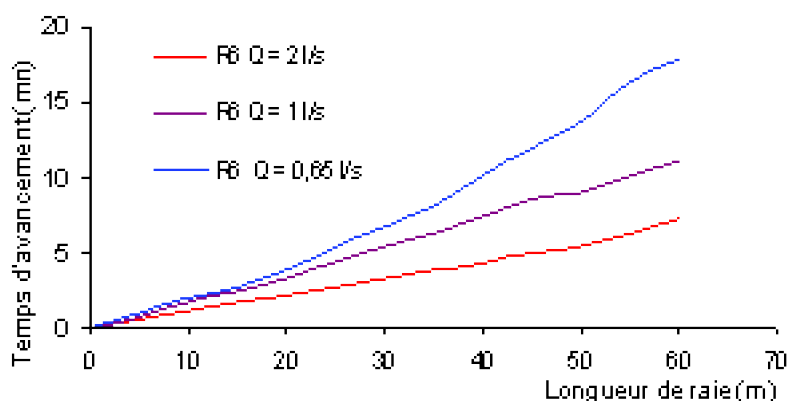


Figure 13 : Courbe d'avancement dans une raie bouchée (R6)

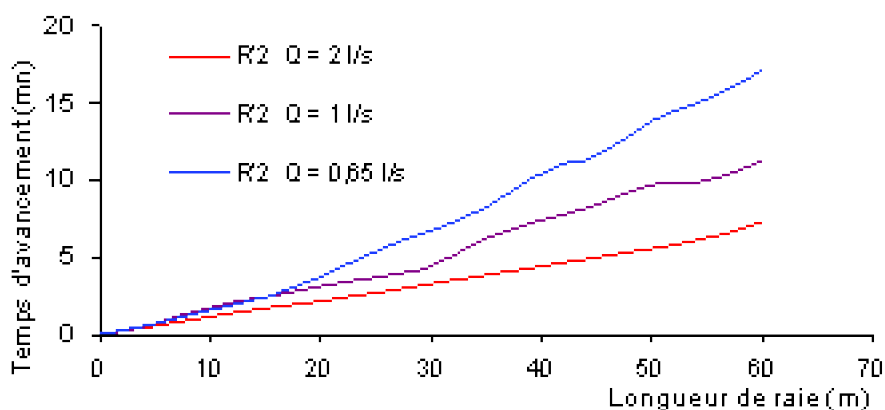


Figure 14: La courbe d'avancement d'une raie non bouchée (R'2).

3.1.3. Comparaison entre raie bouchée et raie non bouchée.

A travers les représentations graphiques de la figure 15, nous constatons que les courbes d'avancement des deux raies ($Q = 2 \text{ l s}^{-1}$) sont identiques. Par contre, pour les autres débits, un léger chevauchement est observé

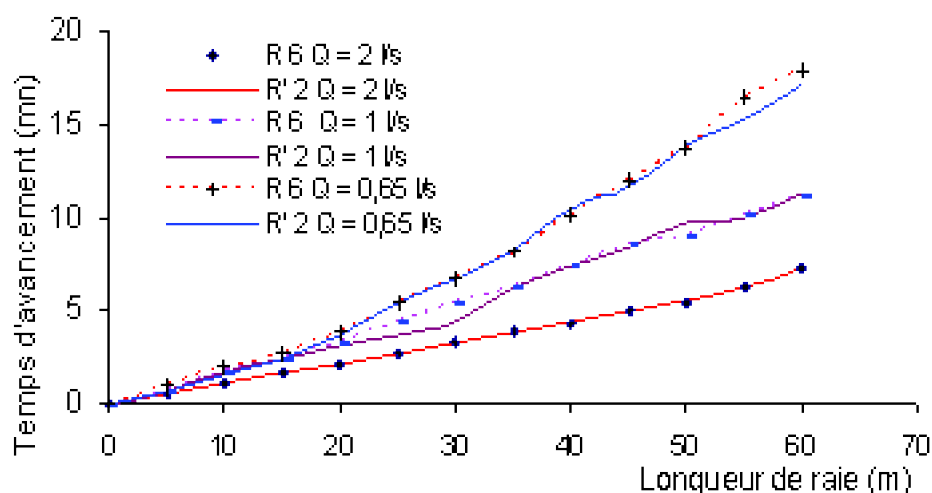


Figure 15 : Comparaison entre raie bouchée R6 et raie non bouchée (R'2)

3.1.4. Comparaison entre la raie R6 et la raie moyenne de la parcelle (conduite en raie bouchée)

Nous avons comparé l'avancement de l'écoulement dans une raie bouchée (R6) choisie au milieu et le résultat moyen de l'avancement de l'écoulement dans le bloc des raies bouchées (tableau 37; 38 et 39 en annexe 2). Les courbes de la figure 16 nous renseignent sur la possibilité de relever les données de l'avancement sur un poste d'une raie au lieu sur toute la parcelle. Les données sont identiques, on n'arrive pas à différencier entre courbe d'avancement d'une seule raie (R6) et la courbe d'avancement moyenne de toute la parcelle. Finalement, le temps d'avancement est influencé uniquement par le débit d'alimentation et non pas par la conduite d'arrosage.

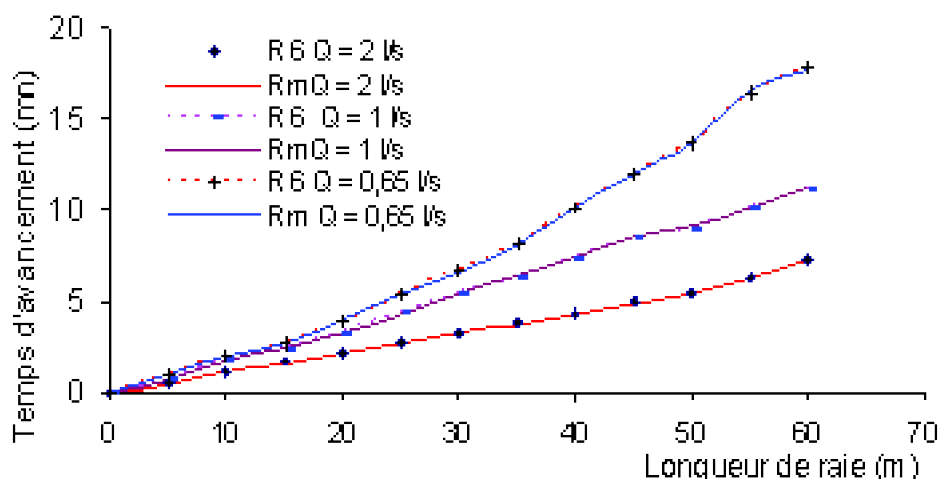


Figure 16 : Comparaison entre raie (R6) et raie moyenne de la parcelle (Conduite en raie bouchée)

3 1.5. Etude de la loi d'avancement de l'écoulement

La détermination de la loi d'avancement consiste à ajuster les mesures de terrain à une des formules suivantes :

3.1.5.1. Formule du Soil Conservation Service (SCS)

$$t(x) = \frac{x}{f} e^{\frac{gx}{\sqrt{S}}} \quad (112)$$

Avec :

- Q, le débit en tête de raie (l s^{-1}) ;
- S est la pente du terrain (raie) ;
- g et f , coefficients du groupe d'infiltration ;
- x est la distance parcourue par l'écoulement (m) ;

Pour $Q=2 \text{ l s}^{-1}$ nous avons $f = 10,65$ et $g = 7,451 \cdot 10^{-4}$; alors la fonction de la durée d'avancement devient :

$$t(x) = 0,093x \cdot e^{0,0063x}$$

3.1.5.2. Formule de Berthomé

$$x(t) = p \cdot t^r \quad (113)$$

Ou inversement

$$t(x) = \alpha \cdot x^\beta \quad (114)$$

Deux méthodes sont utilisées pour l'ajustement de la loi d'avancement proposée par Berthomé (1987). Il s'agit de la méthode logarithmique et de celle de substitution dite de deux points.

Méthode d'ajustement logarithmique

Le principe de cette méthode est de tracer la courbe d'avancement sur un papier log- log, pour avoir une droite linéaire et de déterminer la pente de la droite r ou β , ou de faire une transformation logarithmique et déduire les coefficients p et r ou α et β .

Tableau 17 : Résultats de l'avancement après transformation logarithmique. Cas d'une raie bouchée (R6) pour $Q = 2 \text{ l s}^{-1}$

x (m)	t(s)	t (mn)	Ln x	Ln t
0	0	0	-	-
5	30	0,51	1,61	0,67
10	66	1,10	2,30	0,09
15	99	1,65	2,70	0,49
20	132	2,20	2,99	0,78
25	164	2,73	3,21	1,00
30	197	3,28	3,40	1,18
35	231	3,85	3,55	1,34
40	260	4,33	3,68	1,46
45	296	4,93	3,80	1,59
50	322	5,36	3,91	1,68
55	378	6,30	4,00	1,84
60	438	7,30	4,09	1,98

La méthode calcul de α et de β est la suivante :

La fonction de puissance est :

$$t(x) = \alpha x^\beta \quad (114)$$

Si on fait une transformation logarithmique, on aura

$$\ln t = \ln \alpha + \beta \ln x \quad (115)$$

On applique la transformation logarithmique aux points x_1 et x_2 qui correspondent respectivement aux temps t_1 et t_2 en application de l'équation (74) aux points x_1 et x_2 :

$$\ln t_1 = \ln \alpha x_1^\beta = \ln \alpha + \beta \ln x_1 \quad (a)$$

$$\ln t_2 = \ln \alpha x_2^\beta = \ln \alpha + \beta \ln x_2 \quad (b)$$

L'opération consiste à faire une soustraction pour éliminer la deuxième inconnue α

$$(b)-(a) = \ln t_2 - \ln t_1 = \beta \ln x_2 - \beta \ln x_1,$$

Cette équation a la forme logarithmique de

$$\ln A - \ln B = \ln (A/B)$$

Donc l'équation (b)- (a) devient :

$$\ln (t_2/t_1) = \beta \ln(x_2/x_1)$$

$$\beta = \frac{\ln \frac{t_2}{t_1}}{\ln \frac{x_2}{x_1}}$$

Pour déterminer α , il faut remplacer la valeur trouvée de β dans l'équation suivante

$$t(x) = \alpha x^\beta \text{ et } \alpha = t(x) / x^\beta$$

Méthode de deux points :

La méthode de calcul de α et de β est la suivante :

Deux données sont nécessaires pour l'utilisation de la méthode de substitution : le temps de passage de l'écoulement à mi-chemin $t_{L/2}$ (la moitié de la raie) et le temps de passage à l'aval de la raie t_L .

Si on remplace les paramètres $t_{L/2}$ et $L/2$, t_L et L dans l'équation de puissance

$$t = \alpha x^\beta \quad (71),$$

on aura :

$$t_{L/2} = \alpha L_{/2}^\beta \text{ et } t_L = \alpha L^\beta$$

On applique sur ces deux équations une transformation logarithmique et on aura :

$$\ln t_{L/2} = \ln (\alpha L_{/2}^\beta) = \ln \alpha + \beta \ln L_{/2} \quad (c)$$

$$\ln t_L = \ln (\alpha L^\beta) = \ln \alpha + \beta \ln L \quad (d)$$

$$(c)-(d) = \ln t_{L/2} - \ln t_L = \beta \ln L_{/2} - \beta \ln L$$

$$\ln (t_{L/2} / t_L) = \beta \ln (L_{/2} / L)$$

$$\beta = \ln (t_{L/2} / t_L) / \ln (0,5) \text{ car } (L/2)/L = 0,5$$

Pour trouver α , il faut remplacer la valeur de β trouvée dans l'équation de puissance :

$$t_L = \alpha L^\beta \text{ et } \alpha = t_L / L^\beta$$

3.1.6. Comparaison entre les méthodes SCS et Berthomé

3.1.6.1. Raie bouchée (R6)

Pour mieux interpréter les résultats du terrain par les lois trouvées dans la bibliographie

on passera à leur représentation graphique.

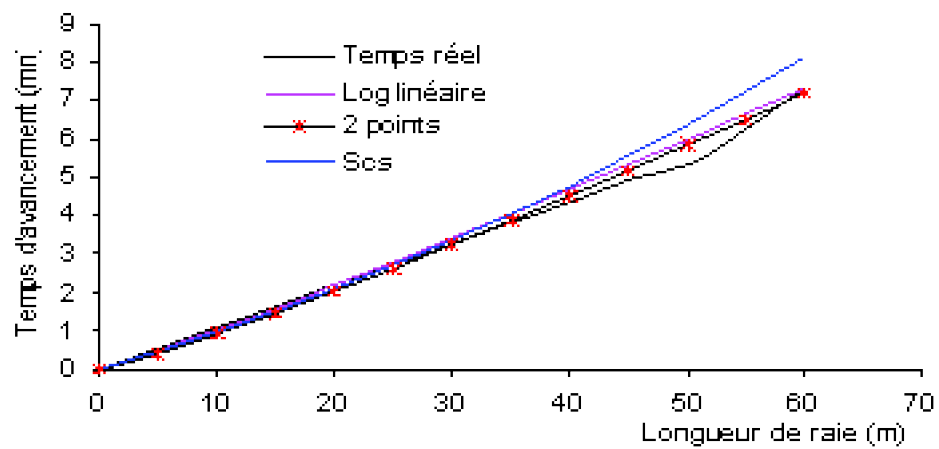


Figure 17 : Ajustement de la courbe d'avancement par les trois méthodes ($Q = 2 \text{ l s}^{-1}$)

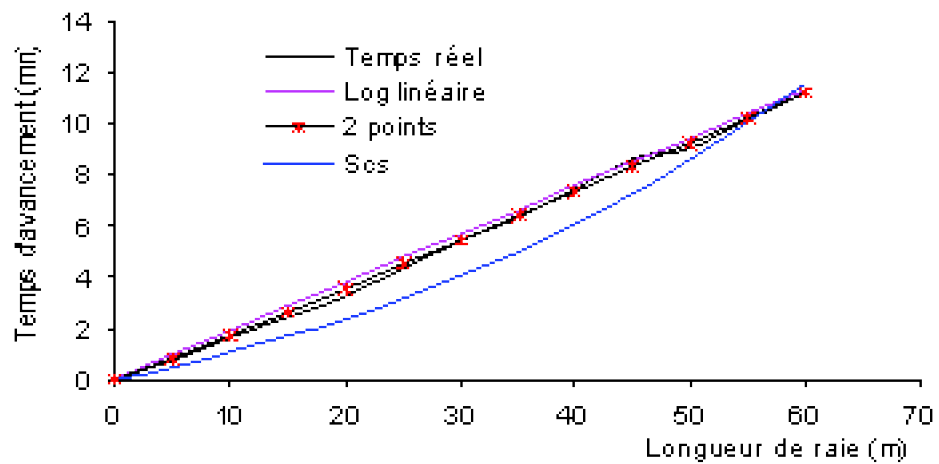


Figure 18 : Ajustement de la courbe d'avancement par les trois méthodes ($Q = 1 \text{ l s}^{-1}$)

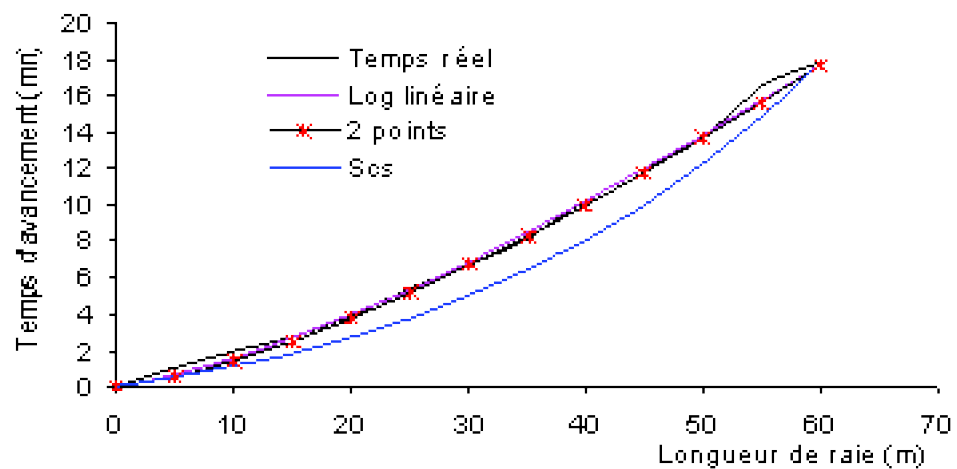


Figure 19 : Ajustement de la courbe d'avancement par les trois méthodes ($Q = 0,65 \text{ l s}^{-1}$)

D'après la figure 17, l'ajustement par la méthode du SCS et les deux méthodes de puissance montre bien que la courbe réelle d'avancement est bien ajustée par les deux méthodes. Par contre, les figures 18 et 19 montrent bien que l'ajustement par le SCS est très éloigné de la courbe réelle cependant, la méthode de Berthomé l'ajuste mieux.

Pour bien connaître le degré de liaison entre les données expérimentales et celles données par les trois méthodes d'ajustement, l'approche est d'appliquer la somme des carrés des écarts :

ec78.gif

Où

t_{re} : temps d'avancement réel (mn)

t_e : temps d'avancement estimé par l'une des trois méthodes d'ajustement (mn)

Q (l s ⁻¹)	Méthode d'ajustement	α	β	σ	$t = \alpha x^\beta$
2	Régression log linéaire	0,081	1,10	0,94	$t(x) = 0,081 x^{1,10}$
	Méthode des 2 points	0,065	1,15	0,71	$t(x) = 0,065 x^{1,15}$
	La loi de SCS			1,85	$t(x) = 0,093x e^{0,1043x}$
1	Régression log linéaire	0,196	0,99	1,78	$t(x) = 0,196 x^{0,99}$
	Méthode des 2 points	0,158	1,04	0,56	$t(x) = 0,158 x^{1,04}$
	La loi de SCS			3,34	$t(x) = 0,093 x e^{0,1122x}$
0,65	Régression log linéaire	0,065	1,37	1,06	$t(x) = 0,065 x^{1,37}$
	Méthode des 2 points	0,055	1,41	1,04	$t(x) = 0,055 x^{1,41}$
	La loi de SCS			5,05	$t(x) = 0,093 x e^{0,0193x}$

Tableau 18 : Comparaison entre les trois méthodes d'ajustements

Si nous comparons l'ajustement des données réelles de l'avancement par les trois méthodes déjà citées, nous concluons qu'avec un débit de $Q = 2 \text{ l s}^{-1}$, l'écart de la SCE entre la méthode de Berthomé et du SCS est très faible et avec les autres débits est élevé. L'écart de la SCE entre les deux méthodes de Berthomé est très faible pour l'ensemble des débits. Finalement, la valeur la plus faible de SCE est donnée par la méthode des deux points donc c'est elle qui ajuste mieux la courbe d'avancement

3.1.6.2. Raie non bouchée (R'2)

Les données de terrain de la phase d'avancement et leur ajustement sont représentés graphiquement.

D'après les figures 20 ; 21 et 22, nous tirons la même conclusion que précédemment. Finalement, c'est la méthode de Berthomé qui donne le meilleur ajustement que ce soit en

raie bouchée ou non bouchée

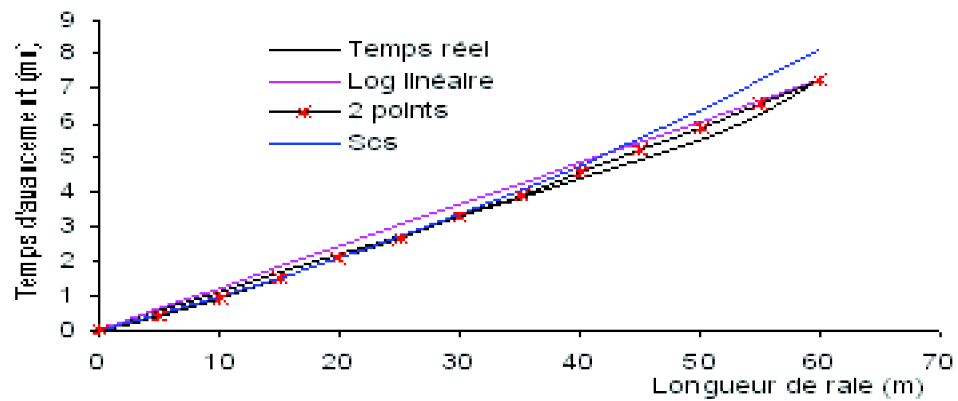


Figure 20 : Ajustement de la courbe d'avancement par les trois méthodes ($Q = 2 \text{ l s}^{-1}$)

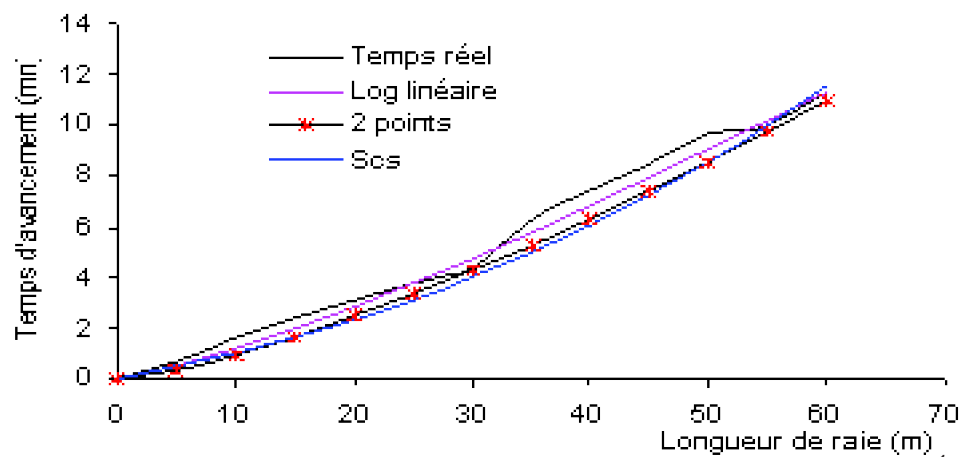


Figure 21 : Ajustement de la courbe d'avancement par les trois méthodes ($Q = 1 \text{ l s}^{-1}$)

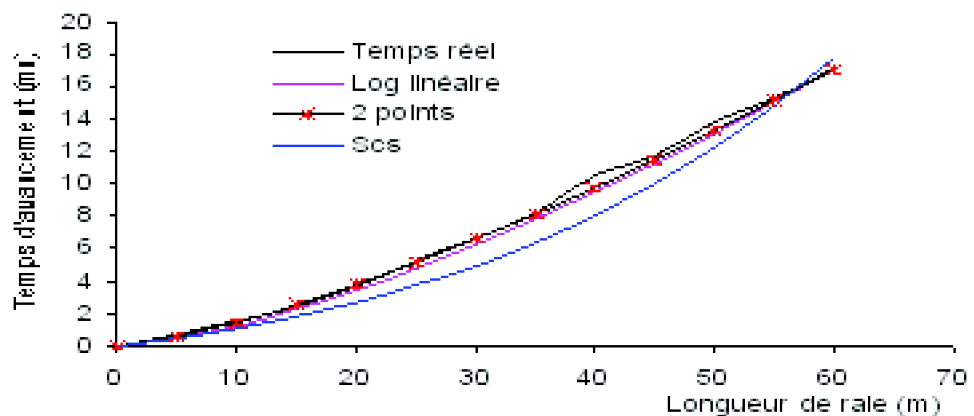


Figure 22 : Ajustement de la courbe d'avancement par les trois méthodes ($Q = 0,65 \text{ l s}^{-1}$)

Q (l s ⁻¹)	Méthode d'ajustement	α	β	σ	$t = \alpha x^\beta$
2	Régression log linéaire	0,126	0,99	1,19	$t(x) = 0,126 x^{0,99}$
	Méthode des 2 points	0,068	1,139	0,66	$t(x) = 0,068 x^{1,14}$
	La loi de SCS		1,250	1,85	$t(x) = 0,093 x e^{0,0043 \pi}$
1	Régression log linéaire	0,068	1,364	2,64	$t(x) = 0,068 x^{1,35}$
	Méthode de points	0,042	1,440	2,52	$t(x) = 0,042 x^{1,36}$
	La loi de SCS		1,356	3,34	$t(x) = 0,093 x e^{0,0122 \pi}$
0,65	Régression log linéaire	0,047		1,6	$t(x) = 0,047 x^{1,44}$
	Méthode des 2 points	0,066		0,077	$t(x) = 0,065 x^{1,36}$
	La loi de SCS			5,05	$t(x) = 0,093 x e^{0,0193 \pi}$

Tableau19 : Comparaison entre les trois méthodes d'ajustements

D'après le tableau 19, l'écart de la SCE entre les deux méthodes est plus faible avec le débit de 2 l s⁻¹ et élevé pour les autres débits. La méthode de Berthomé ajuste mieux l'avancement pour l'ensemble des débits. Finalement, c'est a méthode des deux points qui ajuste mieux la loi d'avancement que ce soit en raie bouchée ou non bouchée.

3.2. Phase de récession

3.2.1. Détermination de la loi de récession

La récession est un phénomène comparable à celui de l'avancement, son principe de mesure, est de noter le temps de disparition de l'eau au niveau de chaque jalon. Ce qui diffère entre l'avancement et la récession c'est que dans l'avancement le mouvement est continu alors que durant la récession il reste des traces de flaques dans les endroits plus bas.

Certains auteurs, entre autres Elliott et Eisenhower (1981), proposent une loi de type puissance pour caractériser la récession.

$$X = C \cdot t_r^\alpha = C (t - t_{co})^\alpha \quad (117)$$

Où t_r représente le temps (mn) écoulé après l'arrêt de l'alimentation en tête, il correspond à l'arrêt du front de récession à l'abscisse x (m)

C et α étant des coefficients d'ajustement.

On peut négliger la phase de récession si le volume infiltré correspondant est faible par rapport au volume infiltré pendant la totalité de l'arrosage, de même, plus la pente est

forte plus faible est la durée de récession.

3.2.2. Résultats de la récession : cas d'une raie bouchée (R6)

Le temps de récession t_r correspond au temps de la disparition de l'eau de la raie, il commence à partir de la coupure t_{co} (temps d'avancement + temps d'entretien) de l'alimentation en eau. Le temps de l'irrigation correspond au temps du début d'alimentation jusqu' à la disparition de l'eau de la raie.

3.2.2.1. Discussion

D'après les résultats de la récession dans le cas de la raie bouchée (R6), on constate que la durée de disparition de l'eau de la surface de la raie augmente avec l'augmentation du débit. Le temps de récession pour les débits $0,65 \text{ l s}^{-1}$, 1 l s^{-1} et 2 l s^{-1} , est respectivement de 56,4 mn ; 58,5 mn et 67,92 mn.

Sur les graphiques de la figure 23; la courbe de récession prend une forme linéaire sur les 3/4 de la longueur de la raie, à 45 m, la courbe change complètement de forme. Cela est du à la présence de calant à la fin de la raie qui ne laissent pas l'eau se dégager. Pour qu'elle disparaisse complètement de la surface elle prend du temps (le sol est à l'état de saturation) et à ce stade l'infiltration se fait au détriment des volumes stockés, ce qui accentue les pertes par percolation près de l'endiguement.

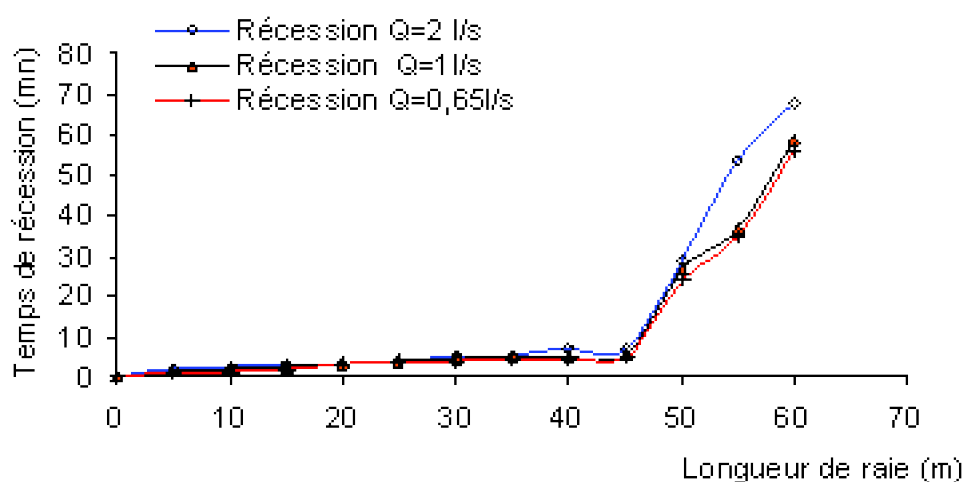


Figure 23 : Courbe de récession cas d'une raie bouchée R6

3.2.3. Résultats de la récession cas d'une raie non bouchée (R'2)

D'après les résultats de la figure 24, le temps de récession t_r est très court et presque identique, une différence de 33 secondes entre le débit le plus élevé et le débit le plus faible. Le temps d'arrosage augmente avec l'augmentation des débits, si nous comparons le temps d'arrosage entre une raie fermée et une raie ouverte, nous constatons qu'il passe du double pour le débit le plus faible au triple pour le débit le plus fort.

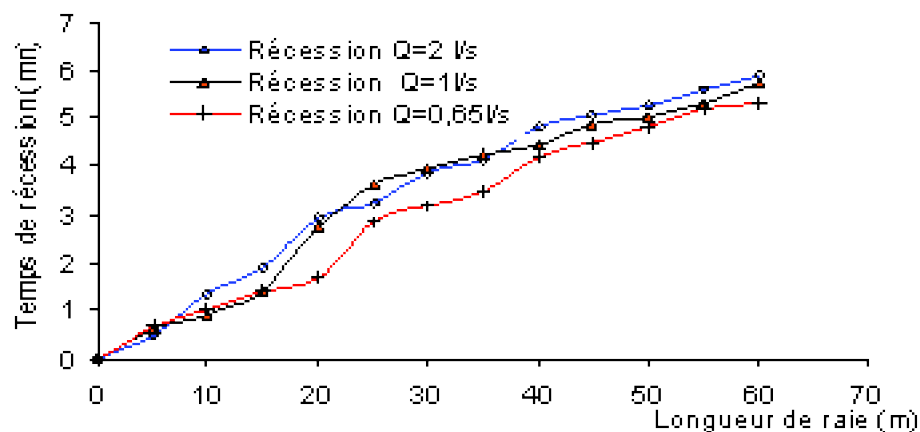


Figure 24: Courbe d'avancement et de récession cas d'une raie non bouchée R'2

3.3. Etude du ruissellement et du stockage superficiel.

3.3.1. Ruissellement en colature (R'2)

Dans le bloc des raies non bouchées (constitué de trois raies), c'est sur R'2 que les volumes de ruissellement et le temps qui leur correspond sont relevés. Le débit du ruissellement en colature est mesuré à partir d'un seuil jaugeur placé à l'extrémité aval de la raie (figure 12). Les mesures du débit de colature sont relevées à partir de la fin de la phase d'avancement (temps t_L) jusqu'à l'arrêt de l'alimentation en tête de raie (t_{co}). Les volumes ruisselés sont calculés par la relation (107)

$Q = 21 \text{ s}^{-1}$			$Q = 11 \text{ s}^{-1}$			$Q = 0,65 \text{ l s}^{-1}$		
t (min)	$Q_c (\text{l s}^{-1})$	$V_c (\text{l})$	t (min)	$Q_c (\text{l s}^{-1})$	$V_c (\text{l})$	t (min)	$Q_c (\text{l s}^{-1})$	$V_c (\text{l})$
7,2	0	0	11,3	0	0	17,1	0	0
8,2	1,10	61,3	12,8	0,20	17,64	19,2	0,16	13,5
9,2	1,15	130,3	14,6	0,20	39,24	21,3	0,11	28,0
10,6	1,25	235,3	16,8	0,25	72,24	24,6	0,12	51,7
11,8	1,28	328,9	18,2	0,30	97,44	27,3	0,12	72,0
			20,3	0,35	141,54	29,1	0,13	86,5
			22,6	0,40	196,74	32,2	0,14	112,6
			23,6	0,40	221,46	34,6	0,14	132,7
						36,3	0,14	147,5
$Q_{\text{ moy.}}$	1,20		$Q_{\text{ moy.}}$	0,30		$Q_{\text{ moy.}}$	0,13	

Tableau 20 : Mesure du ruissellement en colature (R'2)

D'après les résultats du tableau 20, la durée du ruissellement est en fonction du temps d'entretien et le volume ruisselé est plus élevé pour le débit le plus fort malgré que sa durée de ruissellement est courte.

3.3.2. Stockage superficiel

3.3.2.1. Mesure des volumes stockés en surface

Les volumes stockés à la surface de la raie sont déterminés en appliquant la formule (118) qui en fonction de la section mouillée mesurée au niveau de chaque jalon.

$$V_s(x) = 10^3 \Gamma_y A_0 x \quad (118)$$

Où :

V_s : désigne le volume stocké (l) à l'abscisse x (m) ;

Γ_y : facteur de forme du volume stocké en surface, compris entre 0,70 et 0,80 (on retient généralement la valeur 0,77)

A_0 : la section mouillée à la tête de la raie (m^2),

X : la distance de la raie au niveau de chaque jalon (m)

Les résultats des volumes stockés mesurés sont consignés dans les tableaux 21 et 22 pour les deux types de conduite d'arrosage.

X (m)	Q = 2 l s ⁻¹		Q = 1 l s ⁻¹		Q = 0,65 l s ⁻¹	
	t (mn)	Vs (l)	t (mn)	Vs (l)	t (mn)	Vs (l)
0	0	0	0	0	0	0
5	0,51	38,2	0,70	20,1	1,05	18,8
15	1,10	78,3	1,67	40,2	1,95	30,4
15	1,65	110,2	2,43	60,3	2,75	38,6
20	2,20	158,6	3,27	80,4	3,90	64,8
25	2,73	182,6	4,37	100,5	5,37	79,2
30	3,28	220,1	5,42	120,6	6,67	104,4
35	3,85	256,3	6,35	140,7	8,16	112,6
40	4,33	298,9	7,45	160,8	10,17	132,2
45	4,93	340,8	8,58	180,9	120,00	168,0
50	5,36	369,4	9,03	201,0	13,73	182,8
55	6,30	403,2	10,13	221,1	16,50	126,6
60	7,30	432,6	11,17	241,2	17,80	232,6
Entretien	7,3- 11,82	432,6	11,17-23,6	241,2	17,83-6,3	232,6

Tableau 21 : Mesure des volumes stockés en surface cas d'une raie bouchée (R6)

Le débordement est enregistré uniquement avec le débit de 2 l s⁻¹ pendant la récession

X (m)	Q = 2 l s ⁻¹		Q = 1 l s ⁻¹		Q = 0,65 l s ⁻¹	
	t (mn)	Vs (l)	t (mn)	Vs (l)	t (mn)	Vs (l)
0	0	0	0	0	0	0
5	0,57	36,2	0,69	23,6	0,70	9,02
10	1,12	74,6	1,68	46,2	1,63	16,8
15	1,66	109,4	2,39	68,1	2,5	32,4
20	2,21	150,8	3,08	84	3,7	46,2
25	2,75	182,3	3,77	110,2	5,37	59,2
30	3,30	222,6	4,40	128,6	6,7	71,5
35	3,85	260,8	6,30	146,4	8,3	94,2
40	4,40	300,4	7,40	172,2	10,5	119,4
45	4,93	338,2	8,50	190	11,7	151,2
50	5,52	372,8	9,70	212,4	13,8	168,2
55	6,27	402,2	10,01	230,2	15,3	198,6
60	7,27	443,4	11,33	248,4	17,15	220,4
Entretien	7,27-11,8	443,4	11,3-23,64	248,4	17,15-36,3	220,4

Tableau 22 : Mesure des volumes stockés en surface cas d'une raie non bouchée

3.3.2.2. Estimation du stockage superficiel

Lorsqu'on ne dispose pas de mesure du volume stocké, on peut procéder par estimation le volume stocké par l'une des formules suivantes :

$$V_s(x) = 10^3 \Gamma_y A_0 x \quad (118)$$

Où :

Vs : désigne le volume stocké (l) à l'abscisse x (m) ;

Γ_y : facteur de forme du volume stocké en surface, compris entre 0,70 et 0,80 (on retient généralement la valeur 0,77) ;

A_0 : la section mouillée à la tête de la raie (m²), sa valeur peut se déduire de la formule de Manning Strickler ;

$$Q = \frac{10^{-3} A_0}{n} \left(\frac{A_0}{p} \right)^{\frac{2}{3}} \sqrt{S} \quad (119)$$

Q : désigne le débit en tête de raie ($l s^{-1}$) ;

n : coefficient de Manning, ses valeurs s'échelonnent entre 0,02 pour une raie déjà irriguée et à surface lisse, 0,04 pour un sol fraîchement labouré et 0,15 lorsqu'une végétation dense freine le mouvement de l'eau (Walker et Skogerboe, 1984).

La seconde formule empirique du SCS (ASAE ,1983 ; Berthomé, 1983)

$$V_S(x) = \frac{x}{0,305} \left[2,947 \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}} \right)^{0,753} - 0,0217 \right] \quad (120)$$

Avec les mêmes notations que précédemment.

Les deux formules d'estimation du volume stocké sont de la forme :

$$V_S(x) = k \cdot x \quad (121)$$

$$A_0 = 12,5 \left(\frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}} \right)^{0,753} - 0,09 \quad (122)$$

Combinaison des deux formules précédentes

Les résultats des volumes stockés estimés sont consignés dans le tableau 23 en appliquant la formule de SCS (120), nous avons pris une seule application (R6 avec un débit de $2 l s^{-1}$)

Tableau 23 : Le stockage superficiel estimé cas d'une raie bouchée R6 ($Q_0 = 2 l s^{-1}$)

x (m)	t (mn)	vs (l) n =0.02	vs (l) n =0.04
0	0	0	0
5	0,51	35,62	60,28
10	1,10	71,24	120,56
15	1,65	106,80	180,84
20	2,20	142,50	241,12
25	2,73	178,12	301,40
30	3,28	213,75	361,68
35	3,85	249,36	421,97
40	4,33	285,00	482,24
45	4,93	320,60	542,53
50	5,36	356,24	602,81
55	6,30	391,86	633,10
60	7,30	427,44	723,36
Entretien	7,30 -11,82	427,44	723,36

Le coefficient k qui donne le meilleur ajustement des volumes stockés pour les

différents débits, est obtenu par le calcul de k moyen à partir des volumes stockés mesurés. (Tableau 24)

Type de raie	bouchée R6			non bouchée R'2		
Débits ($l\ s^{-1}$)	2	1	0,65	2	1	0,65
K moyen	7,35	4,77	3,24	7,47	4,33	3,17
Coefficient de Manning n	0,021	0,024	0,022	0,021	0,021	0,021

Tableau 24 : Résultats de k moyen

A partir de la valeur moyenne de k , on calcule le coefficient de rugosité de Manning n pour chaque irrigation (chaque débit).

$$n = \frac{\sqrt{S}}{Q} \left[\frac{0,305 \cdot k + 0,0217}{2,947} \right]^{0,753} \quad (123)$$

Les valeurs de n varient entre 0,021 et 0,024, elles sont bien encadrées par les valeurs extrêmes de n qui sont 0,02 et 0,04 ; plus proches de la petite valeur n .

Le calcul de n nous permet de déterminer la section mouillée A d'une raie en appliquant la relation (122).

3.4. Etude de l'infiltration

3.4.1. Détermination des volumes infiltrés

Les volumes cumulés infiltrés se déduisent des mesures des volumes cumulés écoulés en colature et des volumes stockés en surface par l'utilisation de l'équation du bilan en volume.

L'équation du bilan en volume devient :

$$V_e(t) = V_i(t) + V_s(t) + V_c(t) \quad (124)$$

Où :

V_e : volume entré ;

V_s : volume stocké en surface ;

V_i : volume infiltré dans la raie ;

V_c : volume écoulé en colature.

On en déduit le volume infiltré cumulé à l'instant t

$$V_i(t) = V_e(t) - V_s(t) - V_c(t) \quad (125)$$

V_e : volume entré pendant l'avancement et pendant l'entretien (l), il est fonction du

débit en tête et du temps d'alimentation de la raie.

$$V_e(t) = 60 Q_0 t \quad (126)$$

Avec : Q_0 : débit en tête de raie ($l \text{ mn}^{-1}$), et t : temps d'alimentation (mn)

Pour le cas d'une raie bouchée, le volume écoulé en colature est nul et le volume infiltré déduit de l'équation devient :

$$V_i(t) = V_e(t) - V_s(t) \quad (127)$$

Deux modes de calcul des volumes infiltrés sont possibles soit :

-à partir des volumes stockés mesurés sur terrain et on détermine les volumes infiltrés calculés ;

-à partir des volumes stockés en surfaces estimés à l'aide de la formule de SCS et on détermine les volumes infiltrés estimés.

3.4.2. Méthode de calcul des volumes infiltrés

En utilisant l'équation du bilan des volumes $V_e = V_s + V_c + V_i$, le volume infiltré est déduit de la différence entre le volume entré et les volumes stockés et de colature

$$V_i = V_e - (V_s + V_c) \quad (127)$$

Le volume entré (V_e) = débit d'arrosage x temps d'apport

Le temps d'apport = temps d'avancement + temps d'entretien

Le volume entré = volume entré pendant la phase d'avancement + volume entré pendant la phase d'entretien

Le volume stocké à la surface de la raie (V_s) est mesuré à partir de la section mouillée de la raie ou estimé par la formule du SCS pour les deux valeurs extrêmes du coefficient de Manning ($n = 0,02$ et $0,04$).

Le volume de colature (V_c) est mesuré à la sortie de la raie non bouchée.

3.4.3. Résultats des volumes infiltrés

Les volumes infiltrés estimés et mesurés sont respectivement calculés à partir, des volumes stockés estimés par la formule du SCS pour les deux valeurs extrêmes de n , des volumes stockés mesurés,

Les valeurs des volumes infiltrés sont consignés dans les tableaux 25 et 26 uniquement pour le débit de 2 l s^{-1} (deux types conduites d'arrosage) et les tableaux 40, 41, 42 et 43 en annexe 2 pour les débits de 1 l s^{-1} et $0,65 \text{ l s}^{-1}$ (deux types de conduites d'arrosage).

Les volumes infiltrés cumulés, sont calculés en fonction de la section mouillée mesurée au niveau de chaque jalon, sont encadrés par les volumes infiltrés cumulés qui sont estimés par la méthode du SCS en utilisant les deux valeurs extrêmes de Manning pour les deux types de conduite d'arrosage.

t (min)	Volume mesuré (l)			Volume estimé (l)			
	V_e	V_a	V_i	n=0,02		n=0,04	
0	0	0	0	V_a	V_i	V_a	V_i
0,51	61	36,2	25,0	35,6	25,5	60,2	19
1,10	133	74,6	57,4	71,2	60,7	120,5	11,4
1,65	174	105,4	64,6	106,8	67,2	180,8	17,1
2,20	264	150,8	113,2	143,5	131,5	241,1	22,8
2,73	327	182,3	145,3	178,1	140,5	301,4	28,3
3,28	393	232,6	171,0	213,7	179,8	361,6	31,9
3,85	463	260,8	201,7	249,3	212,6	421,9	40,0
4,03	501	338,2	253,4	320,6	271,0	542,5	49,1
6,30	756	402,2	353,8	391,8	364,1	633,1	122,2
7,30	876	442,4	432,6	427,4	448,5	723,3	152,6
7,90	948	442,4	504,6	427,4	530,5	723,3	224,6
8,50	1030	442,4	576,6	427,4	592,5	723,3	296,6
9,70	1164	442,4	720,6	427,4	736,5	723,3	440,6
10,90	1308	442,4	864,6	427,4	662,5	723,3	587,6
11,82	1418	442,4	975,0	427,4	990,9	723,3	695,0

Tableau 25 : Calcul des volumes infiltrés, raie bouchée R6 ($Q = 2 \text{ l s}^{-1}$)

Les valeurs des volumes infiltrés pour la raie non bouchée R'2 sont consignées dans les tableaux 26 et 2 et 2 en annexe 3.

t (min)	V _e (l)	V _c (l)	VOLUME mesuré (l)		VOLUME estimé (l)			
			V _z	V _i	n=0,02		n=0,04	
					V _z	V _i	V _z	V _i
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,57	68,8	0	38,2	20,6	25,62	22,2	60,2	8,6
1,12	135,2	0	78,3	57,0	71,24	64,1	120,5	14,8
1,66	199,4	0	110,2	85,2	106,8	92,4	180,3	18,6
2,21	265,8	0	158,5	107,2	142,5	122,3	241,1	24,0
2,75	330,0	0	182,5	147,4	178,1	151,8	301,4	28,6
3,30	396,0	0	220,1	175,9	212,7	182,2	361,5	35,3
3,83	462,0	0	256,3	203,7	245,3	212,6	421,9	40,0
4,47	528,0	0	298,9	225,1	281,0	242,0	482,2	41,7
4,99	591,6	0	340,8	240,8	320,6	271,0	542,5	49,0
5,52	662,2	0	389,4	252,8	356,2	306,1	602,8	59,43
6,27	752,4	0	403,2	345,2	391,8	360,5	633,1	115,3
7,27	872,4	0	432,5	425,7	427,4	442,9	723,3	145,0
8,21	981,0	61,3	432,5	490,0	427,4	492,1	723,3	195,2
9,20	1104,0	130,3	432,5	541,0	427,4	546,1	723,3	250,3
10,60	1272,0	235,3	432,5	604,0	427,4	605,1	723,3	312,3
11,82	1418,4	308,9	432,5	656,4	427,4	661,7	723,3	365,8

Tableau 26 : Calcul des volumes infiltrés, raie non bouchée R'2 (Q= 2 l s⁻¹)

3.4.4. Estimation sommaire de la qualité d'arrosage

3.4.4.1. Rendement hydraulique moyen

La qualité d'arrosage est appréciée par l'estimation des paramètres de performance tel que le rendement hydraulique et le coefficient d'uniformité et par la dose moyenne infiltrée.

Le rendement hydraulique moyen est déterminé comme suit (128) :

$$RR\% = \frac{V_i}{V_e} 100 \quad (128)$$

V_i : volume d'eau infiltré (l)

V_e : volume d'eau entré (l)

Les valeurs du rendement moyen sont consignées dans le tableau 26

Forme de raie		Bouchée			non bouchée		
Q_0 ($l s^{-1}$)		2	1	0,65	2	1	0,65
Volume d'eau apporté (l)		1418	1418	1418	1418	1418	1418
Volume d'eau infiltré (l)		975	1158	1185,4	656,42	948,14	1050
Rendement hydrau (%)		68,75	81,66	83,59	46,3	66,86	74,4
Dose infiltrée	d_i (mm)	16,25	19,3	19,75	10,94	15,8	17,5
	d_i ($l.m^{-1}$)	21,7	25,73	26,34	14,58	21,07	23,33

Tableau 27 : Le rendement hydraulique moyen et la dose moyenne infiltrée.

On enregistre, soit dans la raie bouchée ou non bouchée des valeurs de rendement hydraulique très élevées pour les débits les plus faibles. Les valeurs enregistrées sont plus élevées en raie bouchée qu'en raie non bouchée. Ceci s'explique par les pertes très importantes en raie non bouchée (pertes en colature et par percolation) qu'en raie bouchée (perte par percolation).

3.4.4.2. Dose moyenne infiltrée

La dose moyenne infiltrée nous renseigne sur la quantité d'eau infiltrée par mètre carré ou par mètre linéaire du sol et elle est déterminée de deux manières différentes :

Soit

$$d_i = \frac{V_i}{L \cdot w} \quad (\text{mm}) \quad (129)$$

Où

$$d_i = \frac{V_i}{L} \quad (l \cdot m^{-1}) \quad (130)$$

L : longueur de la raie (m)

W : espacement entre les raies (m)

D'après ces valeurs (tableau 31), la dose infiltrée est plus élevée pour le débit le plus faible que pour le débit le plus fort. Le temps d'irrigation est très court, il est de 11,82 mn ($Q = 2 l s^{-1}$) pour apporter la dose d'irrigation, il est le double de 23,64 mn ($Q = 1 l s^{-1}$) et le triple de 36,36 mn ($Q = 0,65 l s^{-1}$).

Le temps d'apport influe beaucoup sur la dose infiltrée et par conséquent sur le rendement hydraulique

La dose infiltrée est très importante en raie bouchée qu'en raie non bouchée, cela est

dû à l'endiguement en raie bouchée et aux pertes de colature en raie non bouchée.

Pour mieux apprécier la qualité de l'arrosage, on procède au calcul des lois d'infiltrations et on choisit celle qui ajuste le mieux les volumes infiltrés. C'est à travers la loi d'infiltration choisie qu'on estime les paramètres de performance

3.4.5. Détermination de la loi d'infiltration

Les lois les plus utilisées pour caractériser l'infiltration en irrigation à la raie sont la loi de Kostiakov, celle de Kostiakov modifiée et la loi de Philip.

$$\text{Loi de Kostiakov } Z(t) = k t^a \quad (131)$$

$$\text{Loi de Kostiakov modifiée } Z(t) = k t^a + f_0 t \quad (132)$$

$$\text{Loi de Philip } Z(t) = k t^{1/2} + f_0 t \quad (133)$$

Avec :

$z(t)$ exprimée en l/m représente l'infiltration cumulée pendant la durée t (mn) ;

K , a et f_0 sont des paramètres d'ajustement ;

L'infiltration instantanée $I(t)$ se déduit des formules précédentes :

$$I(t) = \frac{dZ}{dt} \quad (134)$$

Pour la loi de Kostiakov modifiée par exemple :

$$I(t) = ka \cdot t^{a-1} + f_0 \quad (135)$$

Comme l'exposant a est inférieur à 1, f_0 représente l'infiltration instantanée stabilisée qui n'est pas nulle en fin d'arrosage, d'où l'intérêt des lois de Kostiakov modifiée et de Philip.

La loi de Philip est une forme particulière de Kostiakov modifiée avec l'exposant $a = 0,5$.

Le volume cumulé infiltré $V_i(t)$ dans la raie à l'instant t (mn) se calcule de deux manières différentes.

Pendant la phase d'avancement ($0 \leq t \leq t_L$)

$$V_i(t) = \int_0^{x(t)} z(t-t(v)) dv \quad (136)$$

$$\text{Avec } x(t) = p \cdot t^r \quad (137)$$

$$\text{Et } t(v) = \alpha \cdot v^\beta \quad (138)$$

Pendant la phase d'entretien ($t_L \leq t \leq t_{CO}$)

$$V_i(t) = \int_0^t z(t-t(v))dv \quad (139)$$

La détermination de la loi d'infiltration consiste à calculer les coefficients k , a et f_0 tels que les volumes infiltrés V_i s'approchent des volumes infiltrés mesurés.

Nous allons présenter trois méthodes permettant de calculer les coefficients de l'infiltration :

- Méthode de régression log linéaire
- Méthode de Reddell des moindres carrés
- Méthode de Kostiakov modifiée

3.4.5.1. Méthode de Reddell

Cette méthode suppose que la loi d'infiltration est du type Kostiakov et que le volume stocké est négligeable.

En utilisant l'équation suivante :

$$\frac{Q}{x(t)} = k\Gamma(1+a)\Gamma(2-a)t^{a-1} \quad (140)$$

Où $\Gamma(x)$ désigne la fonction Gamma

$$a = 1 - r \quad (141)$$

$$k = \frac{Q}{p\Gamma(a+1)\Gamma(2-a)} \quad (142)$$

Le calcul s'effectuera dans le cas d'un ajustement log linéaire pour la loi d'avancement au cas où nous ne tenons pas compte du volume stocké. Les volumes infiltrés observés sont déduits de l'équation du bilan des volumes qui est en fonction des volumes entrés, stockés et ruisselés, donc nous ne pouvons pas l'appliquer.

3.4.5.2. Méthode de régression log linéaire.

Pour trouver les paramètres de la loi de Kostiakov on applique un ajustement de la régression log linéaire sur l'équation (131).

$$\text{Log } Z = \log k + a \log t$$

$$\text{Log } Z_1 = \log k + a \log t_1$$

$$\text{Log } Z_2 = \log k + a \log t_2$$

La solution de ce système d'équation est de faire une soustraction et de tirer la valeur de a , remplacer cette valeur dans l'équation $Z = k t^a$.

paramètres	Raie bouchée			Raie non bouchée		
	2	1	0,65	2	1	0,65
Q (l s ⁻¹)						
a	0,32	0,4	0,39	0,17	0,39	0,38
k	4,48	3,48	3,02	5,3	3,44	3,25
R	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Γ	2,57	2,66	2,59	1,23	1,71	1,92

Tableau 28 : Résultats des paramètres de la loi de Kostiakov obtenus par régression log linéaire

Les paramètres de la loi de Kostiakov obtenus par la régression log linéaire (tableau 28) nous permettent de nous renseigner sur la représentativité de cette loi aux données du terrain. La valeur de l'écart type Γ est plus faible pour les deux conduites d'irrigations aux différents débits pratiqués. D'après les valeurs de l'écart type Γ la loi de Kostiakov ajuste le mieux la raie non bouchée que la raie bouchée.

3.4.5.3. Méthode de calcul de la loi de Kostiakov modifiée

La loi de Kostiakov modifiée donnée par l'équation (132) est de la forme :

$$Z = k t^a + f_0 t$$

La résolution des paramètres k, a et f₀ est obtenue par la transformée de Laplace de l'équation du bilan des volumes et la méthode des deux points.

La transformée de Laplace

Deux solutions sont possibles, l'une tient compte du volume stocké en surface et l'autre néglige le stockage superficiel.

Cas où on ne néglige pas le stockage superficiel

$$k = \frac{60Q \sin(\pi \cdot r)}{p (1-r)r\pi} - 0,3A_0 \quad (143)$$

$$a = 1-r \quad (144)$$

$$f_0 = \frac{60(Q - Q_c)}{L} - 0,3A_0(1-r) \chi_{co}^{-r} \left[\left(1 + \frac{r^2}{1+r}\right) \frac{t_L}{t_{co}} \right] \quad (145)$$

p et r sont des paramètres d'ajustement de la loi d'avancement, on prend les valeurs données par la méthode des deux points, car c'est elle qui ajuste le mieux l'avancement.

t_L et t_{c0} sont respectivement le temps d'avancement et le temps d'apport

A est la section mouillée en tête de raie, déterminée à partir de la valeur de n calculée (tableau 24) et l'équation (122).

Q et Q_C sont respectivement le débit d'entrée et le débit de sortie.

Tableau 29 : Résultats des paramètres de la loi de Kostiaikov modifiée obtenu par La transformée de Laplace.

Paramètres	Q= 2 l s-1	Q= 1 l s-1	Q= 0,65 l s ⁻¹
Coefficient de Manning n	0,021	0,021	0,021
Section mouillée $A_0 \cdot 10^{-3}$ (m ²)	9,570	5,640	4,053
p	7,170	10,12	7,380
r	0,877	0,733	0,737
a	0,123	0,267	0,263
Q_c (l s ⁻¹)	1,200	0,300	0,130
f_0	0,750	0,645	0,490
k	15,75	5,49	5,150
Γ	15,59	8,52	9,540

La valeur de l'écart type Γ de la loi de Kostiaikov obtenue par la transformée de Laplace est très élevée, cette méthode n'ajuste pas bien les volumes infiltrés.

Cas où on néglige le stockage superficiel (A = 0)

$$k = \frac{60Q \sin(\pi \cdot r)}{P (1-r)r\pi} \quad (146)$$

$$a = 1-r \quad (147)$$

$$f_0 = \frac{60(Q - Q_c)}{L} \quad (148)$$

Nous ne tenons pas compte de cette méthode (cas où le stockage superficiel est négligeable) car les volumes observés sont calculés au détriment des volumes entrés, stockés et ruisselés.

Une autre méthode peut aussi résoudre les paramètres de l'équation de Kostiaikov modifiée (méthode des deux points), elle part de la formule approchée de Christiansen et all (1966) pour estimer la valeur de l'intégrale.

$$V_f(t) = \int_0^{x(t)} z(t - t(v)) dv \quad (149)$$

b) Méthode des deux points (Elliott et Walker ,1982)

$$V_f(t) = \frac{F}{a+r} kt^a + \frac{c}{r+1} t \quad (150)$$

Ou :

r, k, a et c sont des paramètres de la loi d'avancement et de l'infiltration

F est un facteur correctif de Keffer estimé par la formule suivante (151) :

$$F = \frac{a+r - ar + 1}{r + 1} \quad (151)$$

$$c = \frac{60(Q - Q_c)}{L} \quad (152)$$

Q est le débit entré, Q_c est le débit ruisselé et L est la longueur de la raie.

En appliquant cette méthode (méthode des deux points) aux points L/2 et L de la raie, le système d'équation devient :

Au point L (la fin de la raie) :

$$\frac{V_L}{L} = \frac{F}{a+1} kt_L^a + c \frac{t_L}{r+1} \quad (153)$$

Au point L/2 (la moitié de la raie) :

$$\frac{V_{\frac{L}{2}}}{\frac{L}{2}} = \frac{F}{a+1} kt_{\frac{L}{2}}^a + c \frac{t_{\frac{L}{2}}}{r+1} \quad (154)$$

On pose :

$$\alpha = \frac{V_L}{L} - c \frac{t_L}{r+1} \quad (155)$$

$$\text{et : } \beta = \frac{V_{\frac{L}{2}}}{\frac{L}{2}} - c \frac{t_{\frac{L}{2}}}{r+1} \quad (156)$$

$$(102) - (103) \text{ devient } \alpha - \beta = \frac{Fk}{a+1} t_L^a - \frac{Fk}{a+1} t_{\frac{L}{2}}^a$$

$$\text{Ln (102) - (103)) devient } \text{Ln} \frac{\alpha}{\beta} = a \text{Ln} \frac{t_L}{t_{\frac{L}{2}}}$$

$$a = \frac{\text{Ln} \frac{\alpha}{\beta}}{\text{Ln} \frac{t_L}{t_{\frac{L}{2}}}} \text{ Et finalement } K = \frac{kF}{r+1} = \frac{\alpha}{t_L^a} \quad (157)$$

Tableau 30: Résultats des paramètres de la loi de Kostiakov modifiée obtenus par la méthode des deux points

Tableau 30: Résultats des paramètres de la loi de Kostiakov modifiée obtenus par la méthode des deux

points

Paramètres	$Q= 2 \text{ l s}^{-1}$	$Q= 1 \text{ l s}^{-1}$	$Q= 0,65 \text{ l s}^{-1}$
α	4,570	3,590	5,134
β	4,430	3,320	4,290
a	0,039	0,082	0,191
c	0,800	0,700	0,520
k	4,230	2,940	2,980
f_0	0,430	0,404	0,300
Γ	0,700	1,050	1,150

La valeur de l'écart type Γ de la loi de Kostiakov modifiée obtenue par la méthode des deux points est faible, cette loi ajuste mieux les volumes infiltrés.

3.4.5.4. Méthode de calcul de la loi de Philip

Cette méthode est un cas particulier de Kostiakov modifié, le paramètre a de la loi est égal à 0,5.

La méthode de Philip qui est un cas particulier de la méthode de Kostiakov modifiée, présente un écart type plus faible, donc elle est plus proche des résultats (tableau 31)

Tableau 31 : Résultats des paramètres de la loi de Philip

Paramètres	$Q= 2 \text{ l s}^{-1}$	$Q= 1 \text{ l s}^{-1}$	$Q= 0,65 \text{ l s}^{-1}$
a	0,5	0,5	0,5
k	1,69	1,066	1,239
f_0	0,43	0,404	0,3
Γ	1,71	1,3	1,6

3.4.5.5. Comparaison entre méthodes d'infiltrations

Dans le tableau 32, on récapitule les paramètres de l'infiltration des différentes méthodes utilisées pour ajuster les volumes infiltrés observés des trois débits. Les volumes infiltrés observés de la raie bouchée ne sont ajustés que par la régression linéaire.

Q (l s ⁻¹)		Kostiakov (régression log linéaire)	Kostiakov modifié (méthode des deux points)	Philip (cas particulier de la méthode des deux points)	Kostiakov modifiée (Transformée de Laplace)
2	k	5,3	4,23	1,69	15,75
	a	0,17	0,0394	0,5	0,123
	f ₀		0,43	0,5	0,75
	Γ	1,23	0,7	1,71	15,56
1	k	3,44	2,97	1,166	5,49
	a	0,39	0,082	0,5	0,267
	f ₀		0,404	0,404	0,645
	Γ	1,71	1,05	1,3	8,52
0,65	k	3,25	2,98	1,239	5,15
	a	0,38	0,151	0,5	0,263
	f ₀		0,3	0,5	0,49
	Γ	1,92	1,15	1,6	9,54

Tableau 32 : Comparaison entre les paramètres des lois d'infiltration (Raie non bouchée R'2)

D'après les valeurs des paramètres de l'infiltration des différentes méthodes d'ajustement mentionnées dans le tableau 36, si on prend comme référence le minimum de l'écart type pour comparer les différentes méthodes, on constate que :

- ◆ L'utilisation des formules estimées par la transformée de Laplace pour ajuster les valeurs de l'infiltration mesurée, aboutit à une surestimation, car la valeur du minimum de l'écart type est la plus élevée par rapport aux autres méthodes d'ajustements. La courbe d'infiltration obtenue calculée par la transformée de Laplace est très éloignée des valeurs réelles, donc elle surestime beaucoup l'infiltration.

- ◆ La méthode de Kostiakov modifiée, est la loi la plus conforme à nos essais ; la valeur du minimum de l'écart type est la plus faible. Ainsi la méthode de Philip qui est un cas particulier de la méthode de Kostiakov modifiée est plus proche des résultats que les autres méthodes, elle donne une bonne estimation mais celle de Kostiakov modifiée est la meilleure.

- ◆ La loi de Kostiakov représentée par l'ajustement de régression log- linéaire, ajuste les lois d'infiltrations des raies bouchées, par contre pour les raies non bouchées, les valeurs du minimum d'écart type sont moyennement faibles. Cette loi sous estime

l'infiltration car elle s'éloigne des valeurs réelles surtout pendant la phase d'entretien.

3.4.5.6. Estimation de la qualité d'arrosage.

La loi d'infiltration obtenue par Kostikov modifiée calculée par la méthode des deux points est la loi la plus représentative des conditions d'infiltration (raie non bouchée), c'est avec cette loi qu'on peut calculer la dose nette. Etant donné que la dose nette d'arrosage est la dose que l'on apporte à l'extrémité avale de la raie entre la fin de la phase d'avancement et la fin de l'alimentation.

$$dn = k (t_c - t_L)^a + f_0 (t_c - t_L) \text{ (raie non bouchée) (158)}$$

$$dn = k (t_c - t_L)^a \text{ (raie bouchée) (159)}$$

Le rendement hydraulique net est donné par la formule suivante :

$$Rh \text{ net} = \text{dose nette} / \text{dose apportée} = dn / da \text{ (160)}$$

Les pertes par infiltration en profondeur PI :

$$PI = (di - dn) / da \text{ (161)}$$

Paramètres	Raie bouchée			Raie non bouchée		
	2	1	0,65	2	1	0,65
Q (l s ⁻¹)	2	1	0,65	2	1	0,65
Dose apportée da (l.m ⁻¹)	23,62	23,62	23,62	23,62	23,62	23,62
Dose infiltrée di (l.m ⁻¹)	16,25	19,30	19,75	10,94	15,80	17,50
dose nette dn (l.m ⁻¹)	7,26	14,30	9,43	6,40	8,82	11,00
Perte par infiltration PI (%)	69,27	47,90	60,09	19,0	30,53	27,50
Rh net (%)	30,73	52,10	40,00	27,31	36,34	46,57
Rh net (%) (entretien nécessaire)	73,14	75,15	61,60	38,60	47,58	54,40

Tableau 33 : Paramètres de performances

D'après les valeurs du rendement hydraulique net (tableau 33), on remarque que la valeur la plus élevée est enregistrée avec le débit de 1 l/s en raie bouchée R6 (Rh net = 52,1%) et avec le débit de 0,65 l/s en raie non bouchée R'2 (Rh net = 46,57%).

Si l'on tient compte du temps d'entretien et de la récession pour le calcul de la dose nette et le rendement hydraulique net, les nouvelles valeurs changeront automatiquement. Soit une différence de 7,83%, 11,24% et 11,31% respectivement pour le débit de 0,65 l s⁻¹, 1 l s⁻¹ l/s et 2 l s⁻¹ l/s dans le cas d'une raie non bouchée R'2.

Par contre, dans le cas de la raie bouchée R6, la différence du rendement hydraulique net est de 21,6%, 23,05% et 42,41% respectivement pour le débit 0,65 l s⁻¹, 1 l s⁻¹ et 2 l s⁻¹.

Finalement, le meilleur rendement hydraulique est obtenu avec le débit de 1 l s⁻¹ cas d'une raie bouchée R6 et avec le débit de 0,65 l s⁻¹ cas d'une raie non bouchée R'2.

La figure 25, montre que l'optimum du rendement hydraulique net est donné par la gamme des débits variant entre $0,8$ et $1,2 \text{ l s}^{-1}$ (cas de la raie bouchée), cette gamme de débits est la plus efficace pour la raie bouchée .

La même courbe nous montre que, le rendement hydraulique net est inversement proportionnel au débit d'alimentation, les rendements les plus élevés sont donné par la gamme des débits variant entre $0,65$ et $0,8 \text{ l s}^{-1}$ (cas de la raie non bouchée);

cette gammes de débits est la plus efficace pour la raie non bouchée.

Ces gammes de débits sont des indices clairs, précis et devrait être largement vulgarisé, ceci permettra de minimiser les pertes en eau afférente à la pratique de l'irrigation à la raie et améliorer les rendements hydrauliques La quantité d'eau épargnée, permettra par la suite d'augmenter les surfaces irriguées

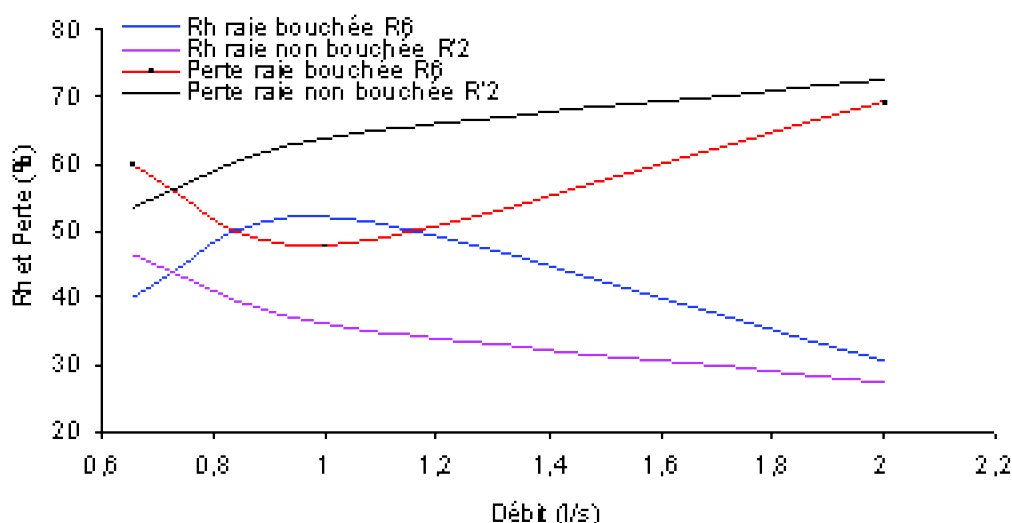


Figure 25 : Rendements hydrauliques et pertes pour les différents débits pour les deux types de conduite d'irrigation

3.5. Méthode de mesure de l'infiltration sur un tronçon de raie (Équivalent au double anneau de Muntz).

Suite aux essais menés sur une raie fermée et une raie ouverte alimentées par un débit unique de 2 l s^{-1} de tirant d'eau de 4 cm , on mesure l'infiltration verticale. Sur un tronçon de raie de $1,5 \text{ m}$ de longueur et $0,75 \text{ m}$ de largeur, on effectue les mesures des volumes infiltrés en fonction du temps. La quantité d'eau injectée dans ce tronçon pour avoir une charge de 4 cm est de 24 litres , une charge supplémentaire de 2 cm demande 10 litres d'eau en plus.

Suite aux résultats de la figure 26 et en les assimilant aux courbes du groupe d'infiltration USDA (1979) tableau 4 et figure 10 de la partie bibliographique, nous choisissons le groupe if $2,0$

Les paramètres suivants nous ont permis de calculer le temps d'avancement proposé par le SCS.

$$a = 2,753$$

$$b = 0,808$$

$$c = 7,0$$

$$f = 10,65$$

$$g = 7,451 \cdot 10^{-4}$$

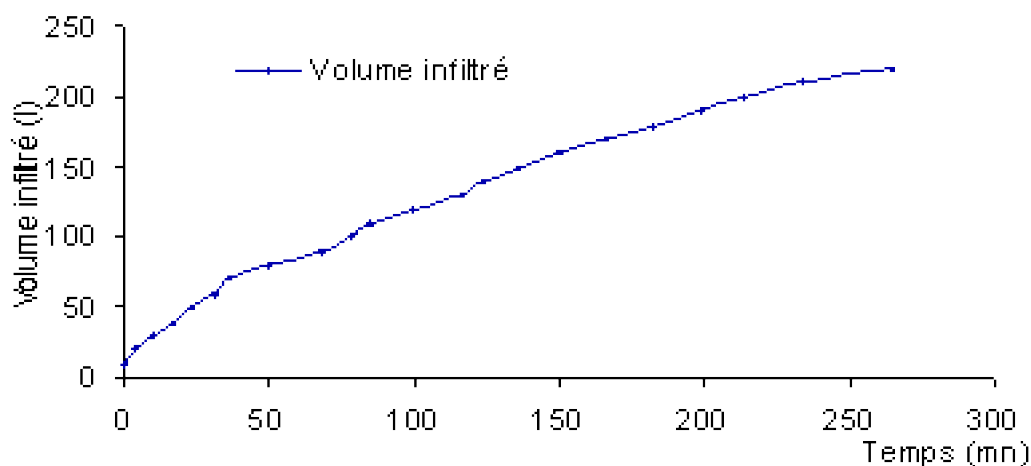


Figure 26 : Courbe d'infiltration sur le tronçon de segua

3.6. Calcul du stock d'eau dans le sol

3.6.1. Humidité du sol

Les mesures d'humidité du sol avant et après chaque irrigation ont été réalisées par la méthode gravimétrique, aux sites de prélèvements (L/8 ; L/2 et 7L/8) de la raie du bloc 1 des raies bouchées (R2 ; R4 ; R6 ; R8 et R10) et de la raie R'2 du bloc 2 des raies non bouchées.

Les résultats de l'humidité et de la variation du stock d'eau sont consignés, dans le tableau 34 pour le débit 2 l s^{-1} (deux types de conduite d'irrigation) et dans les tableaux 47 et 48 (annexe3) pour les débits 1 l s^{-1} et $0,65 \text{ l s}^{-1}$ (deux types de conduite d'irrigation). Les résultats de l'humidité du bloc des raies bouchées sont consignés dans les tableaux 44 ; 45 et 46 (annexe 3).

Forme de raie	Endroit	Profondeur (cm)	H(%) Avant irrigation	H(%) Après irrigation	Variation du stock d'eau ΔS (mm)	
bouchée R6	L ₁ 1/8	25	13,3	16,2	8,64	
		50	12,9	17,5	13,4	
	L ₂ 1/2	25	13,5	17,2	11,2	
		50	13,5	16,9	9,6	
	L ₃ 7/8	25	14,6	17,0	7,1	
		50	13,7	19,2	15,6	
Non bouchée R'2	L ₁ 1/8	25	13,4	16,8	10,2	
		50	14,5	17,2	8,1	
	L ₂ 1/2	25	13,9	17,1	9,6	
		50	14,5	17,4	8,1	
	L ₃ 7/8	25	14,6	17,3	8,1	
		50	13,8	16,9	8,8	

Tableau 34 : Résultats de l'humidité du sol et la variation du stock d'eau ($Q = 2 \text{ l s}^{-1}$)

L'humidité pondérale du sol est calculée par la relation (8) et la variation du stock d'eau dans le sol par la relation (12) pour un horizon et (13) pour deux horizons.

Les résultats du stock d'eau (tableaux 38 ; 39 et 40 en annexe 3) montrent que :

- ♦ Une hétérogénéité de l'infiltration tout le long de la raie pour les différents débits (raie bouchée R6), la valeur du stock d'eau est très importante en aval qu'en amont. (Présence de l'endiguement en aval de la raie)

- ♦ Une homogénéité de répartition en raie non bouchée R'2.

- ♦ La valeur moyenne du stock d'eau pour les débits 2 ; 1 et $0,65 \text{ l s}^{-1}$ est respectivement de 21,85 ; 25,87 et 27,1 mm (raie bouchée R6) et 17 ; 20,46 et 22,16 mm (raie non bouchée R'2). C'est avec le débit le plus faible de $0,65 \text{ l s}^{-1}$ qu'on enregistre le stock d'eau le plus élevé (deux types de conduite) car le temps d'irrigation pour les débits 2 ; 1 et $0,65 \text{ l s}^{-1}$ est respectivement 79,74 ; 82,13 et 92,76 mn (raie bouchée R6) et 17,71 ; 29,39 et 41 ; 69 mn (raie non bouchée R'2).

RFU=37,4 mm Q (l s ⁻¹)	Raie bouchée R6		Raie non bouchée R'2	
	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 1	Horizon 2
2	3,8	23,1	4,5	31,7
1	10,0	49,0	6,0	34,0
0,65	12,4	49,7	7,4	42,8

Tableau 35 : Pourcentage d'humidité volumique du sol avant l'irrigation par rapport à la RFU

A travers les valeurs du tableau 35, avant l'irrigation le deuxième horizon reste humide avec une réserve qui varie entre 23,15 et 49,7% de la RFU en raie bouchée et entre 31,7 et 42,8 % en raie non bouchée . Par contre, le premier horizon reste humide avec une réserve qui varie entre 3,8 et 12,4% en raie bouchée et entre 4,5 et 7,4 % de la RFU en raie non bouchée

Finalement, c'est le premier horizon qui est exposé aux aléas climatiques et assure le transfert hydrique vers l'atmosphère, ce phénomène est moins accentué en raie bouchée qu'en raie non bouchée ; ce qui explique que cette dernière est moins humide que la raie bouchée et ce qui a été confirmé par le rendement hydraulique qui est plus élevé en raie bouchée qu'en raie non bouchée.

Conclusion

Au terme de ce travail, il est possible d'affirmer d'une manière globale, qu'en irrigation à la raie (60 m en moyenne), les débits faibles diminuent fortement les pertes en eau et la pénibilité de travail. Dans ce cas, il est techniquement important de faire la différence entre une raie bouchée et une raie non bouchée

Dans le cas d'une raie bouchée, bien que les pertes en eaux de colature soient évitées, celles liées à la percolation sont importantes en comparaison avec la raie non bouchée.

En raie non bouchée, les pertes par percolation étant importantes nécessitent le choix d'un débit faible et une valorisation de ces pertes. Les lois d'infiltrations demeurent incontournables en vue d'une approche fiable des volumes d'eau infiltrés. Dans la limite de 60 m de longueur de la raie, c'est la loi de Kostiaikov modifiée qui permet une telle approche.

La méthode du bilan de volume s'avère un moyen précis et facile de la quantification des volumes infiltrés. De plus elle est facilement maniable et à la portée du savoir faire de l'agriculteur.

Le rendement hydraulique est un paramètre très pertinent mais qu'il faut prendre avec beaucoup de précaution qu'il s'agisse d'une raie bouchée ou non bouchée. En raie non bouchée le rendement hydraulique est plus faible qu'en raie bouchée, mais si les eaux de colature seront recyclées, le rendement hydraulique dépasserait les 70% pour toute la gamme des débits utilisée.

Le recours à des raies longues (supérieur à 60 m) est envisageable à condition de mettre en œuvre un dispositif capable d'alimenter une série de plusieurs raies à la fois. Ceci est de nature à diminuer la pénibilité de travail et donc les charges en main d'œuvre.

Nous projetons dans une étape suivante d'adapter les modèles d'irrigation à la raie pour une optimisation de sa conduite à grande échelle sur des périmètres irrigués telle que la plaine de la Mina.

Références bibliographiques

- Anonyme, 2004 – L'agriculture irriguée dans le bassin hydrographique du Cheliff-Zahrez. Symposium Technique de Formation sur la Gestion Intégrée de l'Eau et de l'Irrigation, Istanbul, 11-13/octobre/2004. Web Site at: http://www.emwis.org/documents/pdf/20041013_conclusions_FR.pdf
- Baallal, M., 2006. - Etude de l'infiltration par le bilan des volumes dans le cas d'une raie fermée. Thèse Ing. Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur. Mostaganem, 19-32 p.
- Benmouffok B., 2004 – Efforts de l'Algérie en matière d'économie de l'eau et de modernisation de l'irrigation. Actes du Séminaire sur la Modernisation de l'Agriculture Irriguée, du 19 au 23 avril 2004, Rabat, Maroc. Web Site at : <http://www.wademed.net/Articles/004Agid.pdf> .
- Benaçar N. ,2005 –Le droit d'accès à l'eau potable en Algérie .Le droit à l'eau en Afrique et en Europe : actes de la table ronde, le 25 mars 2005 à l'UNESCO. Paris pp 133-153 .Web Site at: (<http://www.idrc.ca/uploads/user-S/10638220971> Algeria-French.ppt.)
- Berthomé, P., 1987. - Evaluation sommaire de la qualité hydraulique des arrosages et possibilités d'amélioration .Cemagref .Division Irrigation ,10p.
- Berthomé, P., 1985. - Evaluation d'un arrosage et automatisation en irrigation à la raie. Etude réalisée avec le concours financier du Conseil Régional Provence Alpes Cote d'Azur. Cemagref, groupement d' Aix -en -Provence. Division Irrigation ,50 p.

- Berthomé, P., 1983. -Conception et fonctionnement des systèmes d'irrigation de surface ou d'irrigation gravitaire. Traduction du chapitre XII de « design and opération of farm Irrigation Système » (ASAE, 1983).Cemagref Division Irrigation ,90 p.
- Chabaca., M.N, 2004. -L'irrigation gravitaire par micro- raie en Algérie. Propositions pour une amélioration de la pratique ou une modernisation de la technique. Quelles alternatives ? Actes du séminaire : Modernisation de l'agriculture irriguée. Rabat 19-3 Avril 2004.Projet INCO-WADEMED.
- Chabaca., M.N ; Messahel M., 2006.-Amélioration de la pratique de l'irrigation traditionnelle par micro raies en Algérie. Annales de l'institut National agronomique .vol.27, n°1-2, El harrach. Algérie, pp 55-82.
- Cemagref, 1992. - Irrigation. 2^e Edition. Groupe France Agricole. Paris, 233-279 p.
- Clouet, Feodoroff, Libois, Meriaux, 1972. -Infiltration et déplacement d'un traceur localisé dans un sol non saturé, effet de l'humidité initiale .Ann. Agr .Vol. 23 N°4. INRA. Versailles. France, 461-468 p.
- Courou, M. ,1969 . -Etude expérimentale de la circulation de l'eau saturante dans des milieux poreux artificiels. Ann. Agr.Vol.20 N°1. INRA Versailles. France, 5-13 p.
- Daifi, N. ,1994. -Optimisation d'un débit d'irrigation et étude de l'infiltration en raie à extrémité avale ouverte et fermée. Thèse Ing. INFSA .Mostaganem, 12-20 p.
- Denis, B., 1988.- Guide des analyses courantes en pédologie. INRA .Paris . France.
- Diarra, Z., 1999. -Synthèse des travaux de recherche sur la modélisation de l'irrigation à la raie. Thèse ing. Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur. Mostaganem, 44-45 p.
- Ducrocq, M., 1987. -Les bases de l'irrigation. Edition. Mkalles- Mar Roukoz Beyrouth, p.54-74.
- Elliott et Eisenhower, 1983. -Volume balance technique for measuring infiltration in surface irrigation .ASAE.
- Guemraoui M. et Chabaca M. N., 2005 – Gestion des grands périmètres d'irrigation : l'expérience Algérienne. Actes du séminaire Euro Méditerranéen « Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués, 21-22 novembre 2005, Sousse, Tunisie
- Gras, R. ,1972. - Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux. Ann. Agr .Vol 3 N°3 .INRA .Versailles. France, p.246-316.
- Habi M. ; Benmoussat A. ,2008 – Le problème de l'eau en Algérie : Une perception encore peu maîtrisée .4^{ème} Conférence Internationale sur les Ressources en Eau dans le bassin Méditerranéen, Watemed4 Alger du 22 au 24 mars. LRS-Eau, Ecole National Polytechnique .El Harrach.
- Halitim A., 1984 - Contribution à l'étude des sols des zones arides (hautes plaines steppiques de l'Algérie). Thèse de Doc. Es Sciences. Université de Rennes. 384p.
- Hillel, D., 1984. -L'eau et le sol. Principes et processus physiques, Belgium, 143-180 p.
- Israelsen et Hansen, 1965. -Traité pratique de l'irrigation .Edition. Inc. N.Y. USA., 180-190 p.

- Kruse et al. ,1983. -L'irrigation aux U S A .Les défis des années 80 .Cemagref. N ° 503 d.Aix -en -Provence .France, p.7-16.
- Landert et Peeters, 1990. -Analyse du sol et interprétation. Faculté des sciences agronomiques. Université catholique de Louvain .Belgique.
- Mermoud A. , 2006. – Cours d' Aménagements et équipements du territoire. Notions fondamentales de l'irrigation. Ecole Polytechnique de Lausanne .Suisse. Web Site at. : <http://echo.epfl.ch/docs/Irrigation-basic.pdf>
- Miloud, B. ,1989. -Contribution à l'étude sur la variation des longueurs de rigoles et débits caractéristiques et leur relation avec l'évolution de l'infiltration de l'eau d'irrigation à différentes profondeurs. Thèse Ing. INA. El Harrach .Alger, p.2-15.
- Musy et Soutter, 1991. - Physique du sol .Ed .Lavoisier. Paris .France.
- Pntta, 2001. - Transfert de technologie en agriculture. Bull .Inf .N°86.Maroc
- Poiree et Ollier, 1971. - Les réseaux d'irrigation théorie, technique et économie des arrosages. Ed. Eyrolles. Paris. France.
- RGA, 2003. -Rapport général des résultats définitifs du Recensement général de l'agriculture .DSASI, MADR, juin 2003, Alger, 127p.
- Sogreah ,1974 .- Manuel de l'adjoint technique du génie rural, travaux sur un périmètre d'irrigation. France, p.20-79.
- Taoussi M. ,2002.- Etude de l'infiltration contrôlée par tensiomètre dans le cas de l'irrigation à la raie (raie à extrémité avale fermée).Thèse Ing. Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur. Mostaganem, 27-30 p.
- Thoma and Wayne, 1998. – Evaluation of furrow irrigation systems research. Associate of professor .Department of agricultural and chemical engineering. Colorado State University. Fort Collins, 120-149 p.
- Vilain M., 1987. - La production végétale, les composantes de la production. Lavoisier .France, 415 p.
- Zella L; Smadhi D., 2007- Evolution de l'irrigation .Larhyss Journal n°6 .Biskra .pp 65-80.

Annexe

Liste des abréviations

Etude de l'infiltration par la méthode du bilan des volumes.

A_0	Section de la raie
A_{Cu}	Section de la raie
C	Conductivité électrique
C_{d}	Coefficient d'uniformité
C_n	Carbone Dose nette
C_b	Carbone Dose brute
C_{ir}	Carbone Dose d'irrigation apportée
d_i	Dose infiltrée
D_a	Densité apparente
D_r	Densité réelle
E	Ecartement de la raie
E_{To}	Evapotranspiration de référence
e	équidistant
E_c	Rendement de transport d'eau
F_n	Infiltration cumulée de SCS
F	Facteur de correction de keffer
GPS	Global Positioning System
H_0	Pression à la surface du sol
H_f	Pression au niveau du front d'humectation
H	Hauteur d'eau dans le seuil parshall
H_{cc}	Humidité à la capacité au champ
H_{pF}	Humidité au point de flétrissement
I	Hauteur d'eau infiltrée
$I(t)$	Indice d'aridité Infiltration instantanée
K	Conductivité hydraulique
L	Longueur de la raie
$L(z)$	La transformée de la place Mètre cube par habitant par an
M_o	Matière organique
M_m	Température maximale
M_n	Température minimale
n	Coefficient de Manning
N	azote
pr	Porosité
P_{30}	Pluie de durée 30 mn de fréquence bisannuelle
P_r	Paramètres empiriques
P_m	Périmètre mouillé
P_Q	Pluviométrie
Q_{max}	Débit maximal
Q_c	Débit de colature
R	Rayon hydraulique
R_h	Rendement hydraulique
RU	Réserve utile
RFU	Réserve facilement élevée
S	sorptivité
SAR	Sodium Adsorption Ration
S_{max}	Pente maximale
S	Pente de la raie
SCS	Service
t_{app}	Temps d'avancement estimé
$t_{réel}$	Temps d'avancement réel
$t_{récession}$	Temps de récession
t_{app}	Temps d'application de l'irrigation (temps d'apport)
t_{co}	Temps de coupure
T	Température
T_{app}	Temps d'application de l'irrigation (temps d'apport)
V_e	Volume entré
V_c	Volume de colature
V_s	Volume stocké
V_i	Volume infiltré
V_{app}	Volume d'eau total apporté dans la raie
V_x	Volume d'eau apporté au point x
V_f	Volume d'eau moyen infiltré
w_r	L'eau détourné à l'exploitation agricole
Y	Charge d'eau dans la raie
$Z(t)$	Infiltration

	cumulée de Kostiakov
$\Gamma_N \Gamma$	L'écart type la fonction gamma

Annexe 1

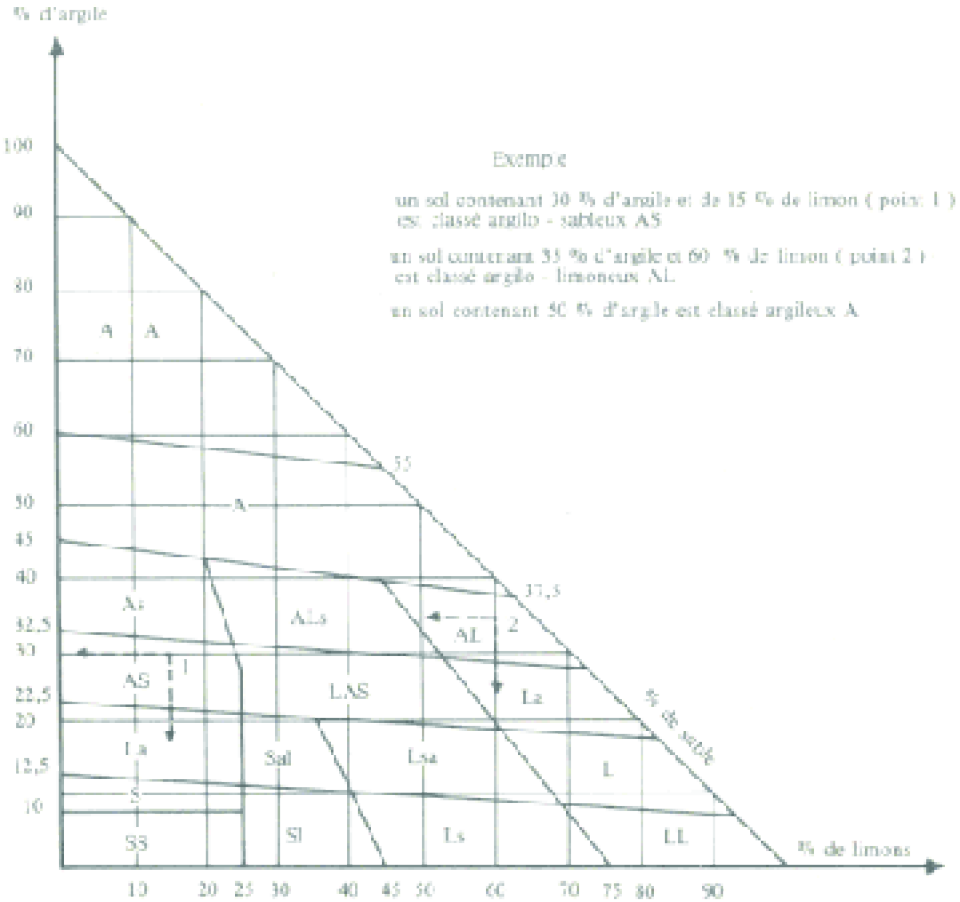


Figure 27 : Triangle des textures (Hillel ; 1984)

Annexe 2

1. Calcul de la dose d'irrigation

1.1. Calcul de la RFU

$$RU = Da (Hcc - HpF) \times 10^4 \times Z \text{ (m}^3 \text{ /ha) A1}$$

$$RU = Da (Hcc - HpF) Z \text{ (mm) A2}$$

$$RFU = \alpha RU \text{ A3}$$

Selon (Sogreah ,1974), la RFU est comprise entre 1/2 et 2/3 de la RU.

Donc α varie entre 1/2 et 2/3 et dépend du type de sol.

Le sol de la parcelle expérimentale est limono sablo argileux, on prend la valeur de $\alpha = 1/2$

$$RFU = 1/2 RU \text{ A4}$$

Tableau 36: Calcul de la réserve facilement utilisable (RFU)

Profondeur des horizons (cm)	da	Hcc%	HpF%	(Hcc - HpF)%	RU (mm)	RFU (mm)
30	1,20	27,32	13	14,32	51,55	25,77
20	1,13	21,32	11	10,32	23,32	11,66
Total					74,87	37,4

1.2. Besoins en eau

Il correspond à l'ETP avec une pluviométrie nulle du mois considéré et réserve en eau non nulle à la fin du mois (i-1)

Si le sol n'intervient pas dans l'alimentation de la plante le déficit agricole représente donc le besoin réel en eau de la plante pour le mois ou la période considéré .Le besoin de pointe sera le déficit agricole mensuel de pointe.

La période d'irrigation est avril, mai et juin ; le mois de pointe est juin

$$\text{Besoin} = \text{ETP} - P - k \text{ (RFU)} = \text{ET0 du mois de juin} = 6,3 \times 30 = 189\text{mm}$$

1.3. La fréquence et la période d'irrigation

N étant la fréquence d'arrosage qui exprime le nombre d'arrosage durant le mois considéré .Il est évident que N sera un nombre entier immédiatement supérieur au chiffre qui résulte du rapport besoin / RFU (Sogreah ,1974).

$$N = \text{Besoin} / \text{RFU} = 189 / 37,4 = 5,05 \text{ A6}$$

$$\text{Fréquence corrigée} = 6 \text{ A7}$$

T étant La périodicité ou encore « tour d'eau » est le nombre de jours séparant deux irrigations successives sur la même parcelle.

$$\text{La période d'irrigation } T = \text{nombre de jours du mois} / N = 30 / 6 = 5 \text{ A8}$$

$$\text{La dose d'irrigation} = \text{dose nette corrigée} = \text{besoins} / \text{fréquence} = 189 / 6 = 31,5 \text{ mm.}$$

Cette dose est appliquée uniquement pour compenser l'évaporation du sol, l'expérience est menée sans culture (sol nu).

2. Temps d'avancement

Tableau 37 : Temps d'avancement (mn) de 10 raies bouchées ($Q= 2 \text{ l s}^{-1}$)

X(m)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R moyen
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,50	0,49	0,49	0,52	0,50	0,51	0,49	0,51	0,50	0,48	0,49
10	1,09	1,08	1,08	1,15	1,08	1,10	1,08	1,08	1,07	1,1	1,09
15	1,62	1,63	1,64	1,67	1,62	1,65	1,63	1,63	1,62	1,64	1,63
20	2,23	2,21	2,20	2,22	2,24	2,20	2,20	2,22	2,21	2,23	2,21
25	2,75	2,72	2,73	2,74	2,75	2,73	2,74	2,74	2,73	2,73	2,76
30	3,30	3,26	3,27	3,29	3,29	3,28	3,3	3,29	3,31	3,32	3,29
35	3,60	3,84	3,82	3,86	3,60	3,85	3,85	3,86	3,85	3,82	3,69
40	4,40	4,32	4,33	4,35	4,35	4,33	4,34	4,33	4,34	4,35	4,34
45	4,91	4,92	4,90	4,96	4,92	4,93	4,92	4,93	4,95	4,94	4,92
50	5,38	5,32	5,30	5,40	5,39	5,36	5,38	5,38	5,36	5,37	5,36
55	6,20	6,28	6,27	6,40	6,40	6,30	6,35	6,28	6,34	6,30	6,31
60	7,29	7,26	7,28	7,38	7,32	7,30	7,32	7,29	7,30	7,31	7,30

*les formules en annexe sont numérotées comme suit Ai (A : signifie annexe, i indique le n ° de la formule).

Tableau 38 : Temps d'avancement (mn) de 10 raies bouchées ($Q =1 \text{ l s}^{-1}$)

X(m)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R moyen
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,72	0,68	0,71	0,70	0,80	0,70	0,68	0,71	0,72	0,70	0,71
10	1,66	1,68	1,67	1,68	1,7	1,67	1,65	1,66	1,70	1,67	1,67
15	2,44	2,42	2,43	2,42	2,44	2,43	2,42	2,42	2,43	2,44	2,43
20	3,28	3,26	3,27	3,28	3,29	3,27	3,28	3,27	3,26	3,25	3,26
25	4,36	4,38	4,37	4,35	4,38	4,37	4,35	4,36	4,37	4,37	4,35
30	5,42	5,41	5,43	5,41	5,42	5,42	5,43	5,44	5,41	5,40	5,41
35	6,35	6,34	6,35	6,34	6,36	6,35	6,35	6,36	6,35	6,34	6,37
40	7,44	7,42	7,40	7,46	7,48	7,45	7,44	7,45	7,43	7,40	7,43
45	8,58	8,56	8,54	8,55	8,59	8,58	8,56	8,57	8,54	8,57	8,56
50	9,02	9,10	9,20	9,10	9,20	9,03	9,04	9,03	9,10	9,01	9,09
55	10,12	10,13	10,15	10,12	10,20	10,13	10,10	10,20	10,0	10,1	10,10
60	11,20	11,23	11,28	11,25	11,3	11,17	11,20	11,19	11,23	11,1	11,22

Tableau 39 : Temps d'avancement (mn) de 10 raies bouchées ($Q= 0,65 \text{ l s}^{-1}$)

Etude de l'infiltration par la méthode du bilan des volumes.

X(m)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R moyen
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1,10	1,04	1,06	1,05	1,06	1,05	1,05	1,06	1,08	1,10	1,06
10	1,98	1,97	1,96	2,00	1,99	1,95	1,98	1,97	1,99	1,96	1,97
15	2,74	2,76	2,78	2,74	2,77	2,75	2,74	2,75	2,76	2,74	2,75
20	3,91	4,10	3,80	4,00	4,15	3,90	3,80	3,90	3,8	4,10	3,94
25	5,36	5,37	5,35	5,36	5,37	5,37	5,36	5,38	5,37	5,36	5,36
30	6,60	6,55	6,80	6,40	6,50	6,67	6,60	6,40	6,50	6,70	6,57
35	8,20	8,10	8,15	8,30	8,10	8,16	8,00	8,20	8,18	8,10	8,14
40	10,3	10,25	10,2	10,1	10,18	10,17	10,20	10,15	10,17	10,2	10,19
45	12,1	11,90	12,2	12,1	12,00	12,00	11,90	12,20	12,30	11,9	12,06
50	13,7	13,76	13,8	13,0	13,8	13,73	13,80	13,60	13,8	13,8	13,68
55	16,6	16,7	16,4	16,5	16,70	16,50	16,5	16,8	16,4	16,7	16,58
60	17,6	17,73	17,7	17,8	17,6	17,8	17,9	17,5	17,4	17,8	17,69

3 .Volumes stockés, infiltrés mesurés et estimés

t (min)	Volumen mesuré			Volumen estimé (l)			
	V_e (l)	V_a	V_i	n=0,02		n=0,04	
0	0	0	0	0	0	0	0
0,7	42	24,2	17,8	20,1	21,9	25,6	6,3
1,6	100,2	48,6	51,6	40,2	60,0	71,2	29,0
2,4	145,8	71,0	74,8	60,3	85,5	106,8	38,9
3,2	196,2	96,8	99,4	80,4	115,8	142,4	53,7
4,3	262,2	110,4	151,8	100,5	161,7	178,1	84,0
5,4	335,2	132,2	193,0	120,6	204,6	212,7	111,4
6,3	381,1	156,4	224,7	140,7	240,4	245,3	131,7
7,4	447,0	168,4	278,6	160,8	286,3	284,9	162,0
8,5	514,8	201,2	313,6	180,9	299,1	320,5	194,2
10,1	607,8	238,6	369,2	221,1	386,7	391,3	215,9
11,7	670,2	280,0	410,2	241,2	428,8	427,4	242,7
12,8	768,0	280,0	468,0	241,2	526,8	427,4	340,5
17,9	1038	280,0	758,0	241,2	796,8	427,4	610,5
19,8	1138	280,0	928,0	241,2	946,8	427,4	760,5
21,5	1290	280	1050,0	241,2	1048,8	427,4	862,5
23,6	1418	280	1158,0	241,2	1176,8	427,4	990,5

Tableau 40 : Calcul des volumes infiltrés, raie bouchée R6 ($Q = 1 \text{ l s}^{-1}$)

t(hmn)	V-humide mesurée (L)			V-humide estimée (L)			
	V_{s1}	V_{s2}	V_{s3}	V_{s1}	V_{s2}	V_{s3}	V_{s4}
0	0	0	0	0	0	0	0
1,0	40,9	18,8	25,1	5,7	25,8	25,6	15,3
1,9	66,0	30,4	45,6	11,1	45,9	51,3	24,7
2,7	107,7	48,6	69,6	17,7	62,0	66,6	30,5
3,9	154,1	64,8	87,3	26,4	71,8	102,6	49,4
5,3	202,4	79,2	120,2	35,2	134,2	128,2	81,1
6,6	262,1	104,4	155,7	45,4	169,7	153,9	106,2
8,1	318,2	112,8	203,6	53,4	212,2	179,5	138,6
10,1	417,2	132,2	283,1	60,5	296,7	203,2	212,0
12,0	468,2	168,0	300,0	65,6	332,7	230,9	237,0
13,7	535,4	182,2	352,6	70,7	384,5	256,6	272,2
16,5	643,5	222,2	416,9	75,7	477,5	222,1	361,2
17,8	694,7	237,7	467,6	80,8	519,5	307,8	386,4
19,5	667,5	237,7	558,0	80,8	579,4	307,8	452,7
22,3	669,0	237,7	670,1	80,8	689,1	307,8	561,9
23,0	675,1	232,6	742,4	80,8	794,1	307,8	667,2
29,2	1152,2	232,6	929,6	80,8	781,2	307,8	854,4
32,6	1271,4	232,6	1132,2	80,8	1090,0	307,8	963,6
36,3	1412,0	232,6	1185,7	80,8	1237,1	307,8	1110,2

Tableau 41: Calcul des volumes infiltrés, raie bouchée R6 ($Q = 0,65 \text{ l s}^{-1}$)

t(x)	Ve (l) VC (l)		Volume mesuré (l)		Volume estimé (l)				
			n=0,7		n=0,4				
			Vs	Vi	Vs	Vi	Vs	Vi	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,04	41,7	0	54,5	18,0	31,2	21,5	35,0	6,0	6,0
1,08	78,2	0	86,2	52,0	40,2	58,0	71,2	17,0	17,0
2,20	145,8	0	68,2	75,0	60,2	85,2	106,2	26,2	26,2
3,08	184,2	0	84,0	100,2	80,2	104,2	142,2	42,2	42,2
3,77	226,0	0	110,2	116,2	101,2	126,2	178,2	48,2	48,2
4,40	254,1	0	158,2	153,2	121,0	145,2	215,2	50,2	50,2
6,20	378,1	0	186,2	151,0	141,2	157,2	249,2	128,2	128,2
7,20	444,1	0	175,2	171,2	161,2	183,2	264,2	150,2	150,2
8,20	510,1	0	160,2	220,0	181,0	219,1	320,2	189,2	189,2
9,70	531,1	0	212,2	260,2	201,0	281,2	356,2	225,2	225,2
11,23	579,2	0	248,2	431,2	241,2	438,2	427,2	252,2	252,2
12,80	758,1	17,2	248,2	501,0	241,2	509,2	427,2	338,2	338,2
14,60	876,1	30,2	248,2	588,2	241,2	583,2	427,2	400,2	400,2
15,80	1008,1	72,2	248,2	687,2	241,2	687,2	427,2	508,2	508,2
18,20	1091,1	97,2	248,2	746,1	241,2	733,2	427,2	567,1	567,1
20,20	1218,1	141,2	248,2	828,0	241,2	833,2	427,2	640,0	640,0
22,60	1356,1	196,2	248,2	910,2	241,2	918,2	427,2	731,2	731,2
28,63	1418,1	251,2	248,2	948,1	241,2	953,2	427,2	760,2	760,2

Tableau 42 : Calcul des volumes infiltrés raie bouchée R6 ($Q=1 \text{ l s}^{-1}$)

Temps (t)	V _e (l)	V _g (l)	Volume mesuré (l)		Volume estimé (l)			
			V _e	V _i	V _e	V _i	V _e	V _i
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30	21,3	0	9,2	16,2	15,0	12,2	25,6	1,6
1,33	63,5	0	36,8	46,7	37,1	33,1	51,3	12,4
2,50	97,5	0	52,4	65,1	45,2	52,2	66,6	20,2
3,30	144,3	0	76,2	96,1	67,2	84,0	101,6	41,6
5,37	209,4	0	109,2	130,2	79,3	134,0	123,2	82,1
6,70	261,3	0	151,5	159,5	97,4	170,8	151,9	107,3
8,30	321,3	0	194,2	209,5	119,4	208,2	176,5	144,1
10,30	409,5	0	219,4	270,1	120,5	289,0	205,2	204,2
11,70	456,3	0	251,2	315,1	133,6	330,6	237,9	225,3
13,30	540,9	0	283,2	362,9	150,7	380,5	259,6	284,2
15,30	596,7	0	328,6	378,1	125,7	430,9	287,1	314,5
17,15	663,2	0	320,1	428,7	130,2	482,0	307,8	361,0
19,30	740,3	11,5	320,4	514,6	110,6	544,4	310,8	437,4
24,60	959,4	51,7	320,4	637,2	130,3	736,7	307,8	600,6
27,30	1064,0	72,0	320,1	771,2	130,2	811,1	307,8	691,2
29,30	1141,9	86,5	320,4	827,9	110,6	867,5	310,8	741,5
32,30	1255,8	112,6	320,4	912,8	130,3	962,3	307,8	833,4
34,6	1349,1	132,76	320,1	956,2	130,2	1035,8	307,8	909,8
36,36	1418,0	147,56	320,4	1011,0	110,6	1106,6	310,8	962,6

Tableau 43 : Calcul des volumes infiltrés raie non bouchée R6 (Q= 0,65l s⁻¹)

Annexe 3

Date	entree	entree m	U20 (mm)	U20 (mm)
2013		(m)	mm/lier	mm/lier
P3	7, 17	0	1, 35	19,40
		0	1, 15	12, 5
		0	1, 10	19, 9
	7, 18	0	1, 09	20, 40
		0	1, 10	2, 3
	7, 27	0	1, 90	21, 20
		0	1, 1	17, 40
P7	7, 19	0	1, 20	19, 9
		0	1, 08	20, 70
	7, 21	0	1, 20	20, 6
		0	1, 16	21, 0
	7, 22	0	1, 21	20, 40
P8		20	15, 20	16, 2
	7, 17	20	14, 5	15, 20
		20	15, 2	15, 20
	7, 18	20	15, 2	16, 2
		20	14, 80	15, 20
	7, 20	20	15, 2	17, 20
		0	1, 105	17, 10
	7, 17	0	1, 10	18, 20
		0	1, 10	21, 20
		0	1, 10	22, 20
P9	7, 17	0	1, 10	21, 20
		0	1, 10	21, 20
		0	1, 10	22, 20
	7, 27	0	1, 10	21, 20
		20	14, 22	18, 2
	7, 19	20	14, 12	19, 2
		20	14, 22	21, 2
P10	7, 19	20	14, 22	20, 2
		20	14, 12	22, 2
		20	14, 12	22, 2
	7, 20	20	16, 11	22, 2
P11		0	1, 1	18, 20
	7, 17	0	1, 10	19, 20
P12		0	1, 20	20, 20
	7, 18	0	1, 10	19, 20
		0	1, 10	22, 20
	7, 27	0	1, 10	21, 20

Tableau 44 : Humidité du sol cas du bloc I avec $Q = 2 \text{ l s}^{-1}$

Cote basculés	cote cm	profondeur cm	Humidité du sol (%)	
			avant	après
23	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00
24	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00
25	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00
26	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00
27	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00
28	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00
29	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00
30	1,00	10	14,00	18,00
		20	14,00	19,00
		30	14,00	21,00
		40	14,00	22,00
		50	14,00	22,00

Tableau 45 : Humidité du sol cas du bloc I avec $Q = 1 \text{ l s}^{-1}$

cas broucha	profil cm	profondeur cm	humidité %	température °C
01	1,10	10	11,3	21,3
		20	11,3	21,4
		30	11,0	21,4
		40	11,0	21,3
		50	11,3	21,3
02	1,10	10	11,69	14,2
		20	11,90	14,2
		30	11,13	14,2
		40	11,17	14,2
		50	11,37	14,2
03	1,10	10	11,30	14,2
		20	11,30	14,2
		30	11,30	14,2
		40	11,30	14,2
		50	11,30	14,2
04	1,10	10	11,5	21,0
		20	11,6	21,0
		30	11,3	21,1
		40	11,1	21,1
		50	11,7	21,1
05	1,10	10	11,16	14,2
		20	11,18	14,2
		30	11,6	14,2
		40	11,10	14,2
		50	11,12	14,2
06	1,10	10	11,22	14,2
		20	11,24	14,2
		30	11,24	14,2
		40	11,24	14,2
		50	11,24	14,2
07	1,10	10	11,95	21,1
		20	11,8	21,0
		30	11,05	21,1
		40	11,00	21,1
		50	11,00	21,1
08	1,10	10	11,32	14,2
		20	11,34	14,2
		30	11,34	14,2
		40	11,34	14,2
		50	11,34	14,2
09	1,10	10	11,8	14,2
		20	11,8	14,2
		30	11,8	14,2
		40	11,8	14,2
		50	11,8	14,2

Tableau 46 : Humidité du sol cas du bloc I $Q = 0,65 \text{ l s}^{-1}$

Forme de raie	Endroit	Profondeur (cm)	H(%) Avant irrigation	H(%) Après irrigation	Variation du stock d'eau ΔS (mm)	
bouchée R6	L ₁ 1/8	25	13,5	17,7	12,7	
		50	14,1	18,1	10,8	
	L ₂ 1/2	25	15,0	20,2	15,7	
		50	16,2	19,9	10,5	
	L ₃ 7/8	25	16,7	23,6	20,7	
		50	17,7	20,2	7,0	
Non bouchée R'2	L ₁ 1/8	25	15,0	18,3	10,1	
		50	13,8	17,1	9,3	
	L ₂ 1/2	25	14,5	18,2	10,6	
		50				
	L ₃ 7/8	25	15,2	18,9	10,5	
		50	13,5	17,3	11,5	

Tableau 47 : Résultats de l'humidité du sol et la variation du stock d'eau ($Q = 1 \text{ l s}^{-1}$)

Forme de raie	Endroit	Profondeur (cm)	H(%) Avant irrigation	H(%) Après irrigation	Variation du stock d'eau ΔS (mm)	
bouchée R6	L ₁ 1/8	25	15,5	20,6	15,3	
		50	15,8	19,8	11,5	
	L ₂ 1/2	25	16,2	21,4	15,6	
		50	16,3	20,0	10,3	
	L ₃ 7/8	25	16,6	22,9	18,9	
		50	16,4	21,5	14,4	
Non bouchée R'2	L ₁ 1/8	25	14,2	18,9	13,2	
		50	15,6	18,2	7,8	
	L ₂ 1/2	25	15,3	19,4	12,3	
		50	15,5	19,8	11,9	
	L ₃ 7/8	25	14,2	17,6	10,2	
		50	15,5	20,6	15,3	

Tableau 48 : Résultats de l'humidité du sol et la variation du stock d'eau ($Q = 0,65l s^{-1}$)

Annexe 4

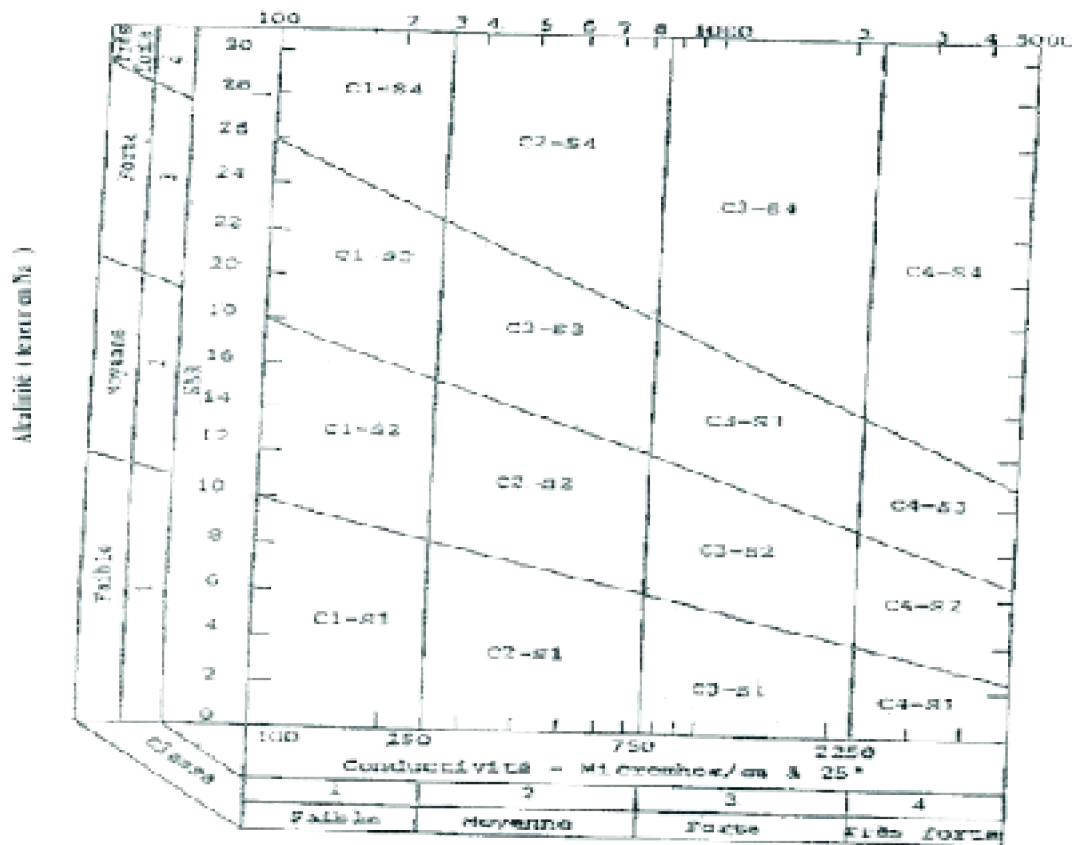


Figure 34 : Diagramme de riverside (Landert et Peeters ; 1990)