

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش- الجزائر

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE

EL-HARRACH –ALGER

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en science Agronomique

Département : Génie rural

Spécialité : Hydraulique

THEME

Analyse technique et diagnostic du système d'irrigation ARSIT (irrigation technology by auto-regulative subsurface pipes) : Cas de la tomate sous serre

Présenté par Mlle MOKRANI Samira

Membres du jury :

| | | | |
|--------------|----------------------------|-------------------------|--------------|
| Président : | M. AIDAOUI Abdellah | Professeur | (ENSA) ALGER |
| Promoteur : | M. CHABACA Mohamed Nacer | Maître de Conférences A | (ENSA) ALGER |
| Examineurs : | M. HARTANI Tarik | Professeur | (ENSA) ALGER |
| | M. MERABET Bachir Azzedine | Maître de Conférences A | (ENSA) ALGER |

Année universitaire 2013-2014

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la foi et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

*En premier lieu, j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à Monsieur **M. N. CHABACA** pour les connaissances et les conseils qu'il m'a transmis et d'avoir accepté de diriger ce travail.*

*Je remercie vivement Monsieur **Aidaoui. A** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.*

*Mes sincères remerciements s'adressent également à Monsieur **T. HARTANI** qui m'a fait l'honneur d'évaluer mon travail.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **B.A.MERABET** pour avoir bien voulu participer à mon jury et juger ce travail.*

A la fin et au terme de ce travail, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à ceux qui m'ont donné
le courage, la foi et la patience.....et à tous
ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour
la réalisation de ce travail*

Sommaire

| | Page |
|--|-----------|
| Liste des figures | I |
| Liste des tableaux | III |
| Liste des abréviations | IV |
| Introduction générale | 1 |
| Partie I : Synthèse bibliographique | 4 |
| Chapitre 1 : Irrigation souterraine | 4 |
| 1-introduction | 4 |
| 2-Techniques d'irrigation souterraine | 4 |
| 2-1-Techniques d'irrigation par pot en argile enterré | 4 |
| 2-2- Techniques d'irrigation par mèche | 7 |
| 2-3- Techniques d'irrigation par tuyau en profondeur | 8 |
| 2-4- Techniques d'irrigation par capsule poreuse en argile | 9 |
| 2-5- Techniques d'irrigation par tuyaux poreux | 11 |
| 2-6- Techniques d'irrigation par goutte à goutte souterrain | 12 |
| 2-7-Technique d'irrigation souterraine innovante avec membrane autorégulante (ARSIT) | 14 |
| 2-7-1-Origine | 14 |
| 2-7-2-Essais caractéristiques du mode de fonctionnement de la technique ARSIT | 15 |
| 2-7-2-1-Essais en laboratoire: | 15 |
| A-Influence de la pression | 15 |
| B-Influence de la température | 16 |
| C-Test sur la capacité d'irrigation des conduites ARSIT | 17 |
| 2-7-2-2-Essais de terrain campagne 2011/2012 | 19 |
| 2-7-2-3-Essais de terrain campagne 2012/2013 | 19 |
| 3-Conclusion | 20 |
| Chapitre 2 : Exigences de la tomate sous serre | 21 |
| 1-Origine | 21 |
| 2-Cycle biologique de la tomate | 21 |
| 2-1-Phase de germination | 21 |
| 2-2-Phase de croissance | 21 |
| 2-3-Phase de floraison | 22 |
| 2-4-Pollinisation | 22 |
| 2-5-Phase de fructification/maturation | 22 |
| 3- Exigences pédo-climatiques de la tomate sous serre | 22 |
| 3-1-Température | 22 |
| 3-2-Lumière | 23 |
| 3-3-Humidité relative | 23 |
| 3-4-Mouvement d'air | 23 |
| 3-5- Sol | 24 |
| 3-5-1-Structure et texture | 24 |
| 3-5-2-Acidité du sol (pH) | 24 |
| 4-Pratiques culturales | 24 |

| | |
|---|----|
| 4-1-Irrigation | 24 |
| 4-2-Fertilisation | 25 |
| 4-3-Principaux ennemis de la culture et méthodes de lutte | 25 |
| 4-4-Récolte, manipulation du produit et conditions d'une bonne conservation | 25 |
| 5-Culture de la tomate sous serre en Algérie | 26 |
| 5-1-Zone de production en Algérie | 26 |
| 5-2-Principales variétés cultivées en Algérie | 26 |
| 5-3- Production de la culture de la tomate sous serre en Algérie | 26 |
| Chapitre 3 : Transferts d'eau dans un sol cultivé | 28 |
| 1-Caractéristiques d'un sol cultivé | 28 |
| 1-1-Représentation physique du sol | 28 |
| 1-2- Stock d'eau du sol | 29 |
| 1-2-1-Cycle de l'eau | 29 |
| 1-2-2-Teneur en eau du sol | 29 |
| 1-2-3- Potentiel de l'eau du sol (charge hydraulique) | 30 |
| 1-3- Propriétés hydrodynamiques de la zone non saturée | 30 |
| 1-3-1-Courbe de rétention du sol $h(\theta)$ | 30 |
| 1-3-2-Conductivité hydraulique | 31 |
| 2- Loi de l'écoulement en milieu poreux non saturé | 33 |
| 2-1-Loi de Darcy en milieu poreux non saturé | 33 |
| 2-2-Equation de Richards | 33 |
| Partie II : Matériels et méthodes | |
| 1-Introduction | 34 |
| 2-Présentation de la zone d'étude | 34 |
| 2-1-Situation géographique de la zone d'étude | 34 |
| 2-2-Etude climatique de la zone d'étude | 35 |
| 2-2-1-Précipitations | 36 |
| 2-2-3-Températures | 36 |
| 2-2-4-Humidité relative | 36 |
| 2-2-5-Vitesse du vent | 37 |
| 2-2-6-Evapotranspiration potentielle (ETP) | 37 |
| 2-3- Caractéristiques pédologiques | 38 |
| 3-Matériels | 39 |
| 3-1-Description du dispositif expérimental | 39 |
| 3-1-1-Réseau d'irrigation de surface DI | 40 |
| 3-1-2-Réseau d'irrigation souterraine ARSIT | 41 |
| 3-1-2-1-Conditions d'installation des conduites d'ARSIT sur le terrain | 43 |
| A-Hydrophilisation | 43 |
| B-Autorégulation | 43 |
| C- Eau d'irrigation de bonne qualité | 44 |
| D- la pose de la conduite | 45 |
| 3-2-Matériel végétal | 46 |
| 3-2-1-Présentation de la culture | 46 |
| 3-2-2-Itinéraire technique | 47 |
| 3-2-2-1-Opérations de travail du sol avant la plantation | 47 |

| | |
|--|----|
| 3-2-2-2-Installation de la culture | 47 |
| 3-2-2-3-Fertilisations | 47 |
| 3-2-2-4-Traitements phytosanitaires | 48 |
| 3-2-2-5- Désherbage | 48 |
| 4- Méthodes | 49 |
| 4-1-Méthodologie du travail | 49 |
| 4-2-Mesures effectuées | 52 |
| 4-2-1-Mesure de la température et humidité de l'air sous serre | 52 |
| 4-2-2-Mesures agronomiques | 53 |
| 4-2-2-1-Suivi des stades phénologiques | 53 |
| 4-2-2-2-Température de la surface du couvert végétal | 54 |
| 4-2-2-3-Hauteur végétative | 54 |
| 4-2-2-4-Rendement | 55 |
| 4-2-3-Mesure de l'humidité du sol pour la tomate irriguée avec ARSIT | 56 |
| 4-2-3-1-Mesure de la teneur en eau du sol | 56 |
| 4-2-3-2-Estimations du stock d'eau | 59 |
| 4-2-3-3-Estimations de la réserve utile du sol | 59 |
| 4-2-3-4- Configuration de la distribution de la teneur en eau dans le sol | 60 |
| 4-2-4-Suivi de la tension en eau du sol de la tomate irriguée avec ARSIT | 60 |
| 4-2-5-Mesure du volume d'eau d'irrigation consommé | 62 |
| 4-2-5-1-Volume d'eau d'irrigation délivré par ARSIT | 62 |
| 4-2-5-2- Volume d'eau d'irrigation délivré par DI | 63 |
| 4-2-6-Mesure des efficacités d'irrigation | 64 |
| 4-3-Conclusion | 65 |
| Partie III : résultats et discussions | |
| 1- Aperçu climatique sous serre et en plein champ durant la période d'essai | 67 |
| 1-1-Température de l'air | 67 |
| 1-2-Humidité de l'air | 68 |
| 1-3-Évapotranspiration de référence | 69 |
| 2-Comparaison des efficacités techniques et agronomique entre ARSIT et DI | 70 |
| 2-1-Comparaison des hauteurs végétatives | 70 |
| 2-2-Comparaison des températures du couvert végétal | 71 |
| 2-3-Comparaison des rendements entre ARSITet DI | 72 |
| 2-4-Comparaison du volume d'irrigation apporté par ARSIT et DI | 72 |
| 3-5- Comparaison de l'efficacité d'irrigation de l'ARSIT et DI | 73 |
| 3-Analyse du fonctionnement autorégulant de la technique ARSIT sur le terrain | 75 |
| 3-1-Évolution de la teneur en eau dans le sol en fonction du temps | 75 |
| 3-2-Évolution spatio-temporelle de la teneur en eau dans le sol | 76 |
| 3-3-Évolution du stock d'eau | 78 |
| 3-4-Estimation de la disponibilité de l'eau à la plante | 80 |
| 3-5-Estimation de la direction de l'écoulement | 81 |
| 3-6-Analyse des doses d'irrigations délivrées par les conduites ARSIT en fonction de la demande en eau de la culture | 82 |
| 3-7-Analyse des débits délivrés par ARSIT en fonction des tensions en eau du sol | 84 |
| 3-8-Analyse du fonctionnement de l'installation ARSIT sur le terrain | 86 |

| | |
|-----------------------------|----|
| Conclusion générale | 88 |
| Références bibliographiques | |
| Annexes | |
| Annexe A | a |
| Annexe B | b |
| Annexe C | d |
| Annexe D | f |
| Annexe E | h |
| Annexe F | k |
| Annexe G | l |
| Annexe H | n |

Liste des figures

| | | Page |
|-----------|--|------|
| Figure 1 | Schéma représentatif de l'irrigation par pot en argile | 5 |
| Figure 2 | Photo représentative de l'irrigation par mèche avec un pot en argile enterré | 7 |
| Figure 3 | Photo représentative de l'irrigation par mèche avec un pot en argile | 8 |
| Figure 4 | Dessin représentatif de l'irrigation par tuyau en profondeur | 9 |
| Figure 5 | Photo représentative de l'irrigation par capsule poreuse | 10 |
| Figure 6 | Dessin schématique de l'irrigation par capsule poreuse | 10 |
| Figure 7 | Dessin représentatif de l'irrigation par tuyaux poreux | 11 |
| Figure 8 | Dessin schématique du réseau d'irrigation goutte à goutte enterré | 13 |
| Figure 9 | Dimensions et structure de la conduite | 15 |
| Figure 10 | Influence de la pression sur le fonctionnement hydraulique de la conduite ARSIT hydrophilisée et non hydrophilisée | 16 |
| Figure 11 | des basses températures sur le comportement hydraulique de la conduite ARSIT | 17 |
| Figure 12 | Dispositif expérimental | 18 |
| Figure 13 | Courbe du débit de la conduite ARSIT en fonction de la tension de l'eau dans le sol | 18 |
| Figure 14 | Evolution des superficies, des productions et des rendements de la tomate sous serre | 27 |
| Figure 15 | Influence de la texture et de la structure sur la relation $h(\theta)$ et effet d'hystérèse | 31 |
| Figure 16 | Allure générale des fonctions $K(h)$ et $K(\theta)$ | 32 |
| Figure 17 | Station expérimentale de l'ENSA | 35 |
| Figure 18 | Localisation des serres à la station expérimentale de l'ENSA | 38 |
| Figure 19 | Schéma représentatif du dispositif expérimental | 39 |
| Figure 20 | Aperçu général du réseau DI | 40 |
| Figure 21 | Vue de face du dispositif ARSIT | 41 |
| Figure 22 | Equipements de l'installation du réseau d'irrigation ARSIT | 42 |
| Figure 23 | Hydrophilisation des conduites ARSIT | 43 |
| Figure 24 | Schéma de la charge hydrostatique appliquée sur la conduite ARSIT | 44 |
| Figure 25 | Pose des conduites ARSIT | 45 |
| Figure 26 | Plants de la tomate au stade de cinquième feuille | 46 |
| Figure 27 | Dispositif expérimental en Bloc | 49 |
| Figure 28 | Diagramme de la démarche de travail adoptée pour la thèse | 51 |
| Figure 29 | Hygromètre installé dans la serre n°1 | 53 |
| Figure 30 | Mesure de la température du couvert végétale avec un thermomètre à infrarouge | 54 |
| Figure 31 | Mesure de la hauteur végétative avec un ruban gradué | 56 |
| Figure 32 | Vue en plant des positions des prélèvements | 56 |
| Figure 33 | Points de mesures de la teneur en eau | 56 |
| Figure 34 | Mesure de la teneur avec TDR | 58 |
| Figure 35 | Emplacement des tensiomètres | 61 |
| Figure 36 | Position des tensiomètres | 61 |
| Figure 37 | Compteur volumétrique ZENNER | 62 |
| Figure 38 | Valeurs de coefficients culturaux en fonction des phases de croissance de la culture de tomate sous serre | 63 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figure 39 | Mesure de l'eau évaporée dans le bac à l'aide de la jauge à crochet | 64 |
| Figure 40 | Evolution journalière de la température sous serre et plein champ | 67 |
| Figure 41 | Évolution journalière de l'humidité relative moyenne de l'air sous serre et plein champ | 68 |
| Figure 42 | Évolution journalière de l'évapotranspiration sous serre et en plein champ | 69 |
| Figure 43 | Évolution de la hauteur végétative de la tomate irriguée par ARSIT et DI | 70 |
| Figure 44 | Évolution de la température du couvert végétal de la tomate irriguée par ARSIT et DI | 71 |
| Figure 45 | Rendement de la tomate irriguée par ARSIT et DI | 72 |
| Figure 46 | Consommation cumulée en eau d'irrigation par ARSIT ET DI | 73 |
| Figure 47 | Profils hydriques du sol pour chaque date de prélèvement | 75 |
| Figure 48 | Configuration de la distribution transversale de la teneur en eau dans le sol autour de la conduite ARSIT | 77 |
| Figure 49 | Évolution du stock d'eau par rapport aux deux limites de la réserve en eau (θ_{CC} et θ_{pf}) | 79 |
| Figure 50 | Tensions de l'eau dans le sol | 80 |
| Figure 51 | Profil de charge de chaque date de prélèvement | 81 |
| Figure 52 | Évolution des doses d'irrigations journalières délivrées par les conduites ARSIT | 82 |
| Figure 53 | Débit délivré per la conduite ARSIT en fonction de la tension en eau du sol | 85 |

Liste des tableaux

| | Page | |
|------------|--|----|
| Tableau 1 | Zone de production de la tomate en Algérie | 26 |
| Tableau 2 | Précipitations moyennes mensuelles (1990 – 2011) Station Dar El Beida | 36 |
| Tableau 3 | Températures moyennes mensuelles (1990– 2011) Station Dar El Beida | 36 |
| Tableau 4 | Humidité relative moyenne (1990 – 2011) Station Dar El Beida | 37 |
| Tableau 5 | Vitesse moyenne du vent (1990 – 2011) Station Dar El Beida | 37 |
| Tableau 6 | Evapotranspiration potentielle (ETP) | 37 |
| Tableau 7 | Propriétés physique et chimique des sols de l'unité expérimentale n°2 | 38 |
| Tableau 8 | Opérations de travail du sol avant la plantation | 47 |
| Tableau 9 | Nombre de plants par ligne | 47 |
| Tableau 10 | Traitements phytosanitaires effectués durant le cycle de la tomate | 48 |
| Tableau 11 | Appareils de mesures utilisés | 52 |
| Tableau 12 | Date d'apparition des stades phénologiques de la tomate irriguée avec DI et ARSIT | 53 |
| Tableau 13 | Dates de mesure de la hauteur végétative | 55 |
| Tableau 14 | Date des cueillettes de la tomate dans les deux serres | 56 |
| Tableau 15 | Dates de prélèvements des échantillons pour la détermination de l'humidité du sol | 57 |
| Tableau 16 | Origine de la valeur de la profondeur racinaire pour chaque stade de développement | 60 |
| Tableau 17 | Résultats des efficacités des deux systèmes ARSIT et DI | 74 |
| Tableau 18 | Valeurs de la profondeur racinaire de la tomate pour chaque stade de développement | 78 |

Liste des abréviations

| | |
|------------|---|
| BMBF | Ministère Fédéral Allemand de l'Education et de la Recherche |
| MADR | Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural |
| CRSTRA | Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Région Arides |
| ITCMI | Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles |
| FAO | Organisation Mondiale pour l'Alimentation et l'Agriculture |
| ARSIT | Auto- Regulative Subsurface Irrigation Technology |
| DI | Drip Irrigation |
| K_c | Coefficient cultural |
| K_b | Coefficient Bac classe « A » |
| ETP | Evapotranspiration potentielle |
| ETM | Evapotranspiration maximale |
| PE | Polyéthylène |
| PVC : | Polychlorure de vinyle |
| WUE | Water Use Efficiency |
| EA | Efficienc Agronomique |
| R_{cc} | Réserve en eau à la capacité au champ |
| R_{pf} | Réserve en eau au point de flétrissement |
| RU | Réserve Utile |
| Θ_v | Teneur en eau volumique |
| Θ_p | Teneur en eau pondérale |
| D_a | Densité apparente |
| T_c | Température du couvert végétal |
| T_{mn} | Température minimale |
| T_{mx} | Température maximale |
| T_{moy} | Température moyenne |
| H_{mn} | Humidité minimale |
| H_{mx} | Humidité maximale |
| H_{moy} | Humidité moyenne |
| TR_{mn} | Température au point de rosé minimale |
| TR_{mx} | Température au point de rosé maximale |
| TR_{moy} | Température au point de rosé moyenne |
| JAP | Jours Après Plantation |

Introduction générale

Dans le contexte mondial actuel, il y a une pression croissante sur les ressources en eau due à une demande croissante en eau d'irrigation, aux changements climatiques et à la croissance démographique. Pour de nombreux pays, leur consommation en eau dépasse leurs ressources en eau renouvelables cela conduit à l'épuisement de ces ressources. L'irrigation consomme 70% des ressources en eaux de surface et souterraine du monde ; dans les pays en développement cette valeur peut atteindre 95% et les plus grandes superficies irriguées se trouvent dans les pays en développement avec 73% (Duehrkoop, 2009).

L'Algérie est au cœur d'une région des plus déficitaires en eau dans le monde. Ce déficit s'explique à la fois par une augmentation constante des besoins en eau et par l'installation d'une sécheresse récurrente ainsi que des réserves en eau de surface et souterraines limitées. Les ressources en eau superficielles et souterraines, en Algérie, sont estimées à environ 19,2 milliards de m³, elle est classée comme un pays pauvre en eau avec 500 m³/habitant/an par rapport au seuil de rareté fixé à 1000 m³/habitant/an (FAO, 2010).

Cette rareté en eau est un facteur limitant du développement de l'économie du pays surtout dans le secteur agricole. Cela ralentit l'objectif d'améliorer la sécurité alimentaire. Face à cette rareté, le recours à l'agriculture irriguée, au contraire de l'agriculture pluviale, permet une certaine garantie dans la stabilité de la production agricole et pourquoi pas son amélioration, si cela s'accompagne par une gestion rationnelle des ressources en eau.

En Algérie plus de 53,5% des superficies sont irriguées traditionnellement par gravitaire, 21,5% en irrigation localisée et 25% par aspersion, pour une superficie totale irriguée de 1103498 ha (MADR, 2013). La conduite de ces irrigations est majoritairement empirique. Les équipements en irrigation localisée et par aspersion ne répondent pas très souvent aux normes et sont de ce fait peu performants (INSID, 2011). De ce fait, la productivité de l'eau a besoin d'être améliorée en développant de nouvelles techniques d'irrigation telle que l'irrigation souterraine qui optimise la quantité d'eau libérée dans la zone d'enracinement tout en réduisant les pertes d'eau par évaporation. Il y a donc un besoin crucial d'investir dans des travaux de recherches sur des technologies d'irrigation innovantes pour aider à améliorer la productivité de l'eau, tout en favorisant une exploitation durable des ressources en eau.

Dans cette optique un projet de recherche initié par BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) organisme de coopération allemand avec l'Algérie et le Kenya, propose de développer une technique d'irrigation souterraine innovante ARSIT (irrigation technology by auto-regulative subsurface pipes) qui avait d'abord été testée en laboratoire. Le projet est coordonné par l'université de Kassel (Allemagne) avec comme partenaires, l'université d'Egerton (Kenya), l'école nationale supérieure agronomique (Algérie), le centre de recherche en sciences et technologies des régions arides (CRSTRA ; Algérie). Cette technique d'irrigation innovante utilise des conduites en matériaux poreux enterrés, l'innovation repose sur le principe de l'autorégulation de l'humidité du sol.

Les premiers travaux de recherche ont été réalisés dans le laboratoire de l'université de Kassel en Allemagne (2008 à 2009) et ont porté sur le mode de fonctionnement de la technique. Ils ont montré que les conduites ont une propriété spécifique d'autorégulation de l'humidité du sol au voisinage de la capacité au champ et aussi ont estimé que son efficacité à l'utilisation de l'eau est élevée par rapport aux systèmes d'irrigation de surface. Actuellement l'objectif du projet est de tester cette technique innovante sur le terrain dans des conditions réelles et sous différents climats (Algérie du nord, sud, et zone tropicale). Durant l'année 2012 les chercheurs du projet ont réalisé cinq essais sur le terrain, deux essais au Kenya (sous serre et plein champ irrigués avec de l'eau de bonne qualité et de l'eau de moins bonne qualité) et trois essais en Algérie, deux réalisés au niveau de la station d'Eloutaya (Biskra) par le CRSTRA (sous serre irriguée avec l'eau du barrage "fontaine des gazelle" et l'eau de forage) et un essai sous serre réalisé par l'ENSA au niveau de la station expérimentale de l'ITCMI. Pour l'année 2013, six essais ont été réalisés, quatre expériences ont été répétées dans les mêmes sites (Kenya, CRSTRA), une expérience effectuée au niveau de la station expérimentale de l'ENSA et une expérience sous serre réalisée à l'université de Kassel en Allemagne. Ces essais ont abouti à des résultats qui ont permis de relever les qualités de cette technique ainsi que les exigences de son domaine d'application.

Dans cette optique et en continuité des travaux déjà réalisés nous avons mis en essai la technique (ARSIT) sur terrain durant l'année 2013, pour l'irrigation d'une culture maraîchère sous serre (tomate) au niveau de la station expérimentale de l'ENSA, en basant l'étude sur les aspects suivants:

1-Étudier la capacité de la conduite à l'autorégulation de l'humidité du sol durant tout le cycle de croissance de la culture en réalisant les mesures suivantes :

- Teneur en eau du sol à des pas de temps constants avec pour objectifs d'estimer la variation du stock d'eau dans le sol, d'apprécier la situation de la réserve en eau du sol par rapport aux deux limites θ_{cc} et θ_{pf} et de faire un suivi de la distribution spatio-temporelle de la teneur en eau du sol tout autour de la conduite ;

- Des suivis journaliers de la tension de l'eau dans le sol avec pour objectifs d'estimer la disponibilité de l'eau pour la plante et la direction de l'écoulement de l'eau à partir du gradient de la charge hydraulique ;

2-Déterminer l'efficacité de la technique ARSIT et la comparer avec celle de la technique d'irrigation localisée DI pilotée dans les mêmes conditions techniques, en réalisant les mesures suivantes :

- Des suivis des volumes d'eau d'irrigation délivrés par chaque système pour estimer la consommation en eau ;

- Mesures phénologiques (hauteur de la plante) et physiologiques (température du couvert végétal) pour apprécier l'état de développement de la culture ;

- Estimation de rendements de la culture pour chaque technique d'irrigation ;

3-Identifier les obstacles éventuels qui limitent le fonctionnement correct de la technique sur le terrain et connaître l'aptitude de la conduite à son milieu.

Les résultats de l'étude permettront de bien comprendre le principe de fonctionnement du système ARSIT et de déterminer les problèmes éventuels liés au fonctionnement de la technique sur le terrain, pour essayer d'améliorer l'installation de la technique selon les conditions locales spécifiques et ses performances.

Partie I

Synthèse Bibliographique

Chapitre 1 : Irrigation souterraine

1-Introduction

L'irrigation souterraine pratiquée depuis des centaines d'années par les agriculteurs d'une façon manuelle non mécanisées comme l'irrigation par pot en argile enterré, l'irrigation par capsule poreuse, l'irrigation par mèche et l'irrigation par tuyau en profondeur, et ensuite avec l'introduction de la mécanisation à ces systèmes d'irrigation souterraines ont donné naissance à des nouveaux systèmes comme l'irrigation souterraine avec goutte à goutte et tuyau poreux.

Les techniques d'irrigation utilisées actuellement dans l'agriculture peuvent être divisées en deux modes, l'irrigation souterraine et l'irrigation de surface. La technique prédominante est l'irrigation de surface dont l'eau est fournit à la plante en surface. Cette technique d'irrigation est prédominante à cause de son faible coût d'investissement et sa manipulation facile, néanmoins, environ 40% à 60% de l'eau utilisée dans l'irrigation est perdue, cette faible efficience est due aux pertes par percolation, évaporation et mauvaise gestion des eaux (Duehrkoop, 2009). L'irrigation souterraine est une méthode d'irrigation plus efficace dont l'eau alimente sous la surface du sol directement la zone racinaire des plantes, en éliminant les pertes d'eau par évaporation et réduit le développement des mauvaise herbes et les maladies, mais elle est rarement utilisée en raison des coûts d'investissement élevés.

2-Techniques d'irrigation souterraine

2-1-Techniques d'irrigation par pot en argile enterré

L'irrigation par pot en argile enterré est une technique d'irrigation souterraine connue depuis des milliers d'années dans les régions arides et semi-arides. Le pot en argile non décoré est enterré dans le sol et rempli d'eau, dont l'eau diffuse dans le sol à travers la paroi poreuse du pot (voir figure 1). Les pots varient en forme, en taille et en composition des matériaux. La plupart des pots en argile cuite utilisés sont de forme sphérique, avec des volumes allant de 0,6 litre pour les pots au Zimbabwe à plus de 15 litres en Equateur et jusqu'à 24 litres en Inde (Duehrkoop, 2009).

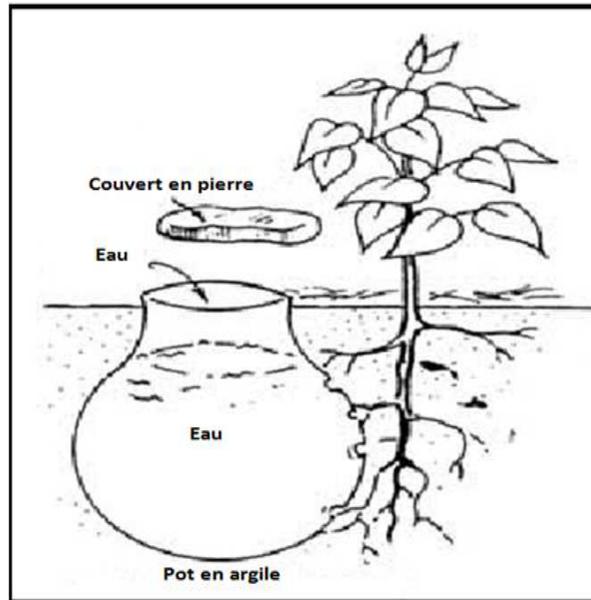


Figure 1 : Schéma représentatif de l'irrigation par pot en argile
Source : INFONET-BIOVISION ,2010

Une caractéristique particulière dans cette technique d'irrigation est sa capacité d'autorégulation du potentiel matriciel du sol, qui résulte de l'interaction étroite entre le pot et son environnement, à savoir la plante, le sol et la matière de pot, si le potentiel matriciel est élevé (sol sec), le pot fournira de l'eau au sol, si l'humidité du sol augmente, le potentiel matriciel diminuera et le débit d'eau diffusé par le pot diminuera aussi jusqu'à l'arrêt de la diffusion.

Le fonctionnement efficace de cette technique d'irrigation est fonction de la conductivité hydraulique du matériau constitutif du pot. Ce dernier est commandé par la température de la combustion lors de la fabrication et la matière première du pot. La substance de base constitutive du pot est l'argile et pour améliorer sa porosité on lui ajoute du sable, de la farine de scie et de la farine de liège. Un autre paramètre important intervient dans le fonctionnement de la technique c'est le potentiel matriciel du sol, ce dernier est fonction du type du sol et de sa teneur en eau. La teneur en eau du sol est régulée par l'évapotranspiration, qui est contrôlée par les paramètres climatiques tels que la température, le rayonnement, le vent et la transpiration de la plante etc.

Ainsi, les matériaux du pot (étant fixes pour une construction du pot donnée) et le potentiel matriciel du sol en fonction de la teneur en eau du sol et le type du sol, régulent la quantité

d'eau délivrée par le pot. De ce fait, le mécanisme d'écoulement d'eau est commandé par la teneur en eau existante dans le sol, ce qui signifie que le système est auto-régulatif.

La technique d'irrigation du pot en argile enterré offre les avantages suivants :

- L'autorégulation du potentiel de l'eau du sol, en assurant une teneur en eau stable, constante et évite le stress hydrique à la plante ;
- L'efficacité de l'utilisation de l'eau est très élevée (la percolation profonde, et les pertes par évaporation sont réduites) ;
- L'eau est diffusée dans la zone racinaire des plantes, la surface du sol est sèche ce qui réduit les mauvaises herbes ;
- La fertigation est très efficace et rentable (utilise moins d'engrais par rapport aux méthodes conventionnelles) ;
- Faible coût de la technologie de la technique;
- Utilisation de matériaux locaux pour la production des pots (argile) ;
- Une production locale des pots est possible et qui peut créer des emplois dans les zones rurales, en particulier pour les femmes ;
- Facile à utiliser et à entretenir, aucune connaissance ou formation particulière s'est nécessaire.

Cependant cette technique présente des inconvénients sur terrain comme :

- Pas de possibilité de mécanisation de la technique, l'installation des pots se fait seulement à la main ;
- Un nombre élevé de main-d'œuvre est demandée ;
- Avec une eau non traitée les pots doivent être vidés une fois par an afin d'éviter le bouchage des pores des pots ;
- Seulement applicable à des petites surfaces agricoles ;

-La longévité des pots n'est pas satisfaisante (1 à 3 ans).

2-2- Techniques d'irrigation par mèche

Le système d'irrigation par mèche est une technique utilisée en Inde à l'aide des pots en argile enterrés, un trou ou des trous sont percés dans le pot de terre enterré et des mèches en coton sont insérées dans le trou (voir figure2). Les mèches aident à déplacer le plus d'eau dans le pot d'argile afin d'encourager un grand développement des racines (Bainbridge, 2002).



Figure 2 : Photo représentative de l'irrigation par mèche avec un pot en argile enterré

source : THE HINDU, 2008

Actuellement la diffusion de l'eau se fait par deux systèmes, un système par capillarité et un système par gravité (voir figur3). Le système capillaire utilise une mèche dans un tube qui s'élève au-dessus du niveau d'eau, le mouvement de l'eau est limité mais constant, et le système gravitaire utilise une mèche au-dessous du niveau d'eau, et l'eau s'écoule à travers la mèche. Les mèches utilisées sont en nylon tressé solide ou en coton, la mèche en nylon fonctionne mieux que celle en coton parce qu'elle limite le développement des microorganismes.

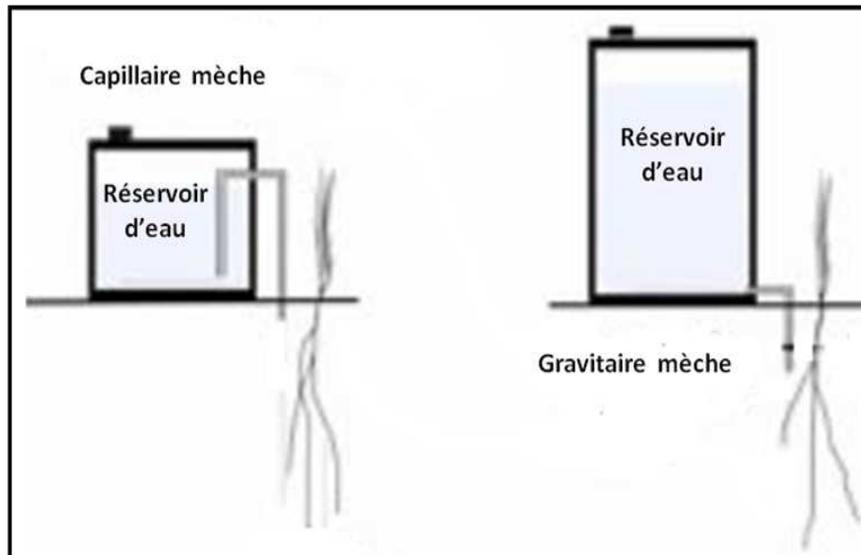


Figure 3 : Photo représentative de l'irrigation par mèche avec un pot en argile

Source : Agroforestry.net, 2012

L'irrigation par mèche présente les mêmes inconvénients et les mêmes avantages que l'irrigation par pot en argile enterré mais elle offre d'autres avantages :

- Elle fournit une source d'eau plus lente et plus régulière par rapport aux pots enterrés ;
- Elle favorise le développement des racines et la croissance de la plante par rapport aux pots enterrés.

2-3- Techniques d'irrigation par tuyau en profondeur

L'irrigation par tuyau en profondeur utilise un tuyau vertical troué installé à proximité de la plante, l'eau d'irrigation est remplie par l'extrémité supérieure du tuyau et l'eau diffuse dans la zone racinaire profonde à travers les trous (voir figure 4). Les tuyaux utilisés sont couramment en PVC de 1 à 3 cm de diamètre placés verticalement dans le sol et avec une profondeur de 30 à 50 cm latéralement de la plante ou un arbre. Les séries de trous sont percés le long du tuyau avec un diamètre de 1 à 2 mm espacés d'environ 5 à 7,5 cm. Le tuyau est équipé d'un couvert d'écran collé au sommet du tuyau avec joint de silicone pour empêcher les lézards et les animaux de rentrer dans le tuyau. Les tuyaux peuvent être remplis d'eau avec une citerne d'eau, un tuyau, arrosoir à la main et un goutteur (Bainbridge, 2006).

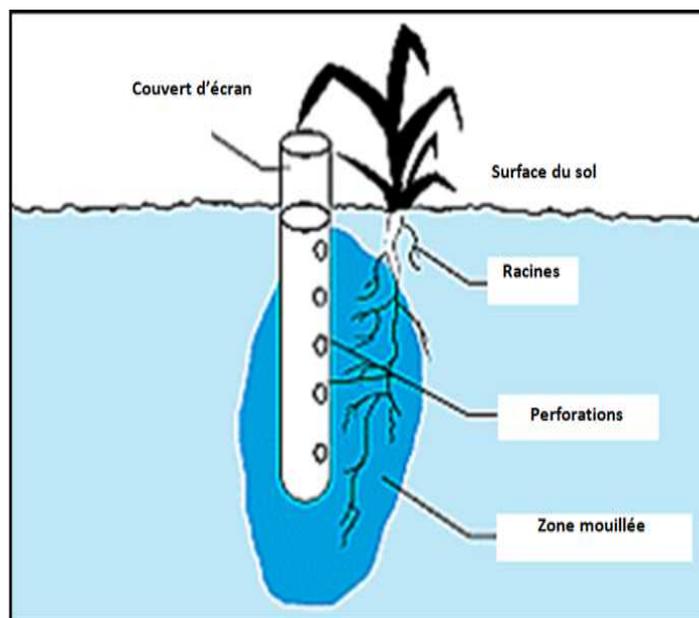


Figure 4 : Dessin représentatif de l'irrigation par tuyau en profondeur
Source : FAO, 1997

L'irrigation par le tuyau profond aide la plante à développer un volume racinaire beaucoup plus important que d'autres techniques d'irrigation et la plante est mieux adaptée quand un arrêt d'irrigation s'est produit durant la saison d'été où les pluies sont rares. Des expériences en Afrique ont démontré que les racines de la vigne atteignent 100 cm horizontalement en irrigation de surface classique, seulement 60 cm avec goutte à goutte de surface, mais 178 cm avec tuyau d'irrigation profond.

La technique d'irrigation par tuyau profond ne présente pas des pertes d'eau par évaporation ou par ruissèlement (réduit le développement des mauvaises herbes), elle n'exige pas la présence d'un système sous pression et un système de filtration. Cette technique ne nécessite pas une eau d'irrigation d'une bonne qualité et en plus sa manipulation ne demande pas une main d'œuvre qualifiée. Mais l'irrigation par tuyau profond ne s'adapte pas pour les jeunes plantations et les plantes à enracinement superficiel. Les racines de la plante ne peuvent pas entrer en contact avec l'eau d'irrigation diffusée par le tuyau en profondeur, ce qui limite la croissance de la plante.

2-4- Techniques d'irrigation par capsule poreuse en argile

Le système d'irrigation par capsule poreuse est une adaptation moderne et efficace de l'irrigation par pots en argile enterré. La capsule poreuse en argile est formée soit par un seul pot enterré soit par deux pots en argile collés (voir figure 5).



Figure 5 : Photo représentative de l'irrigation par capsule poreuse
 Source : Bainbridge, 1997

Les capsules sont attachées à un réseau de canalisations d'alimentation en eau et avec des connecteurs de grand diamètre qui nécessitent moins de filtration et une pression relativement faible (Bainbridge, 2008).

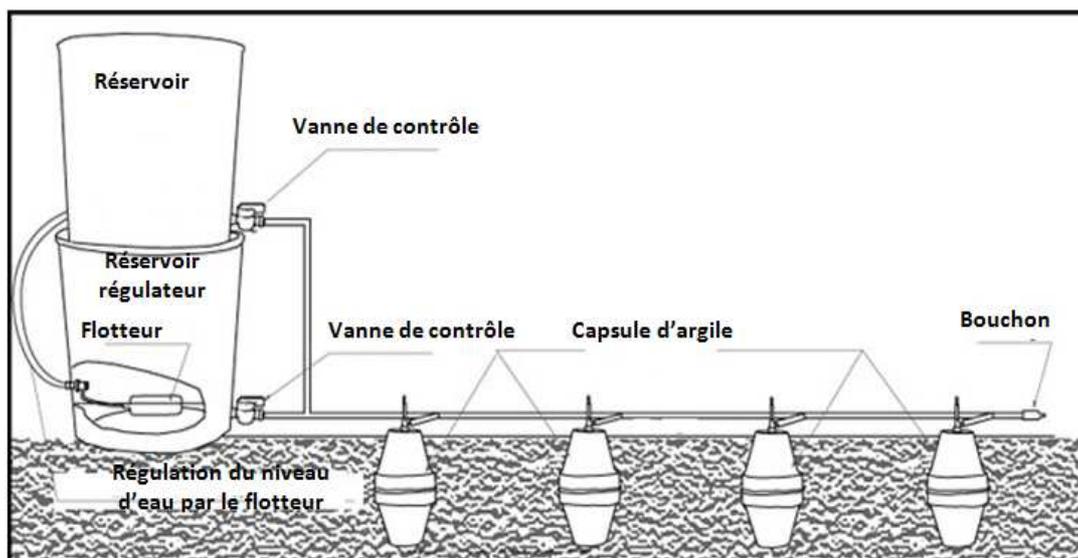


Figure 6 : Dessin schématique de l'irrigation par capsule poreuse
 Source : Garden, 2010

L'irrigation par capsule poreuse est plus efficace pour l'utilisation de l'eau par rapport à l'irrigation souterraine par pot en argile enterré, mais elle est plus coûteuse à fabriquer et à installer et aussi très difficile pour le nettoyage des pots.

2-5- Techniques d'irrigation par tuyaux poreux

L'irrigation par des tuyaux poreux est une technique similaire à l'irrigation par conduites de drainage. Dans cette technique les tuyaux sont répartis le long d'une bande horizontale continue dans le sol (voir figure 7). La méthode des tuyaux poreux est plus appropriée pour les cultures en rangs rapprochés cultivés dans des lits, comme les cultures maraîchères. Les tuyaux sont enterrés au-dessous de la surface du sol à 30 et jusqu'à 45 cm et espacés de 60 à 120 cm. Une des extrémités du tuyau poreux remonte au-dessus du sol pour que l'opérateur soit en mesure de le remplir avec de l'eau dès que cela est nécessaire (Bainbridge, 2008).

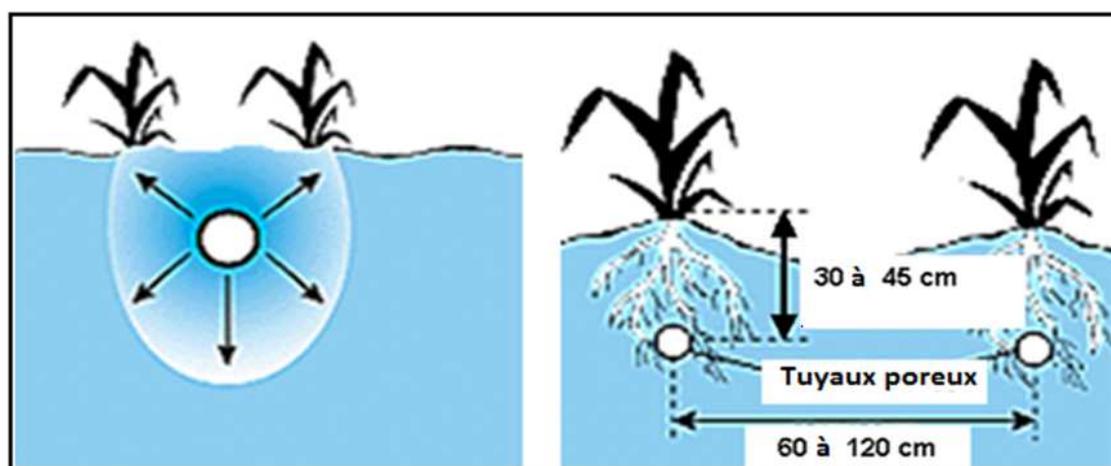


Figure 7 : Dessin représentatif de l'irrigation par tuyaux poreux
Source : FAO, 1997

La technique d'irrigation par des tuyaux poreux offre plusieurs avantages, parmi ses avantages en citant :

- Les travaux du sol sont plus faciles, pas de tuyaux à déplacer;
- La fertirrigation plus efficace ;
- Diminution du lessivage des éléments nutritifs dans la zone des racines;
- Le contrôle des mauvaises herbes est facilité. La surface du sol reste plus sèche, créant un milieu inhospitalier à la germination des graines de mauvaises herbes ;
- Les pertes par évaporation sont réduites. L'évaporation survient dans la couche la plus près du sol, or celle-ci n'est que très peu mouillée.

Cependant cette technique diffuse l'eau d'irrigation le long d'une ligne horizontale dont la distribution de l'eau dans le sol se fait sur toute la longueur du tuyau non seulement là où il est perforé, cela signifie que son efficacité est faible par rapport à l'irrigation goutte à goutte.

2-6- Techniques d'irrigation par goutte à goutte souterrain

La technique d'irrigation goutte à goutte enterré (Subsurface drip irrigation) est une technique à basse pression et à haute efficacité d'irrigation qui utilise des tuyaux en goutte à goutte enterrés. L'eau est acheminée sous une faible pression à travers les tuyaux et diffusée par les gouteurs sur les racines sous la surface du sol. C'est une technique qui fournit des arrosages fréquents pour répondre aux besoins en eau des cultures, adapté pour les zones arides, semi-arides, chaudes, et venteuses avec un approvisionnement en eau limité et une production à grande échelle (D. Reich, R. Godin, 2009). Sa conception est similaire à celle du goutte à goutte de surface (voir figure 8). Elle possède les mêmes composants, tels que les bassins de décantation, pompe, vannes anti-refoulement et unité d'injection des fertilisants. Les tuyaux sont enterrés sous la surface du sol de 10 à 60 cm selon la culture et le type de sol. Le système est piloté automatiquement, néanmoins l'exploitation d'un tel système nécessite des contrôles réguliers et systématiques des composants mécaniques de l'installation et un nettoyage périodique des tuyaux du système de filtration.

La technique de goutte à goutte enterré nécessite un investissement initial élevé et le coût variera en fonction de la source d'eau, la qualité, le besoin de filtration, le choix des matériaux, les caractéristiques du sol et du degré d'automatisation souhaité. Le coût de la technique, y compris l'installation, peut varier de 1000 \$ à 2000 \$ par acre (1 acre=4046 m²=0.40 ha) (D. Reich, R. Godin, 2009).

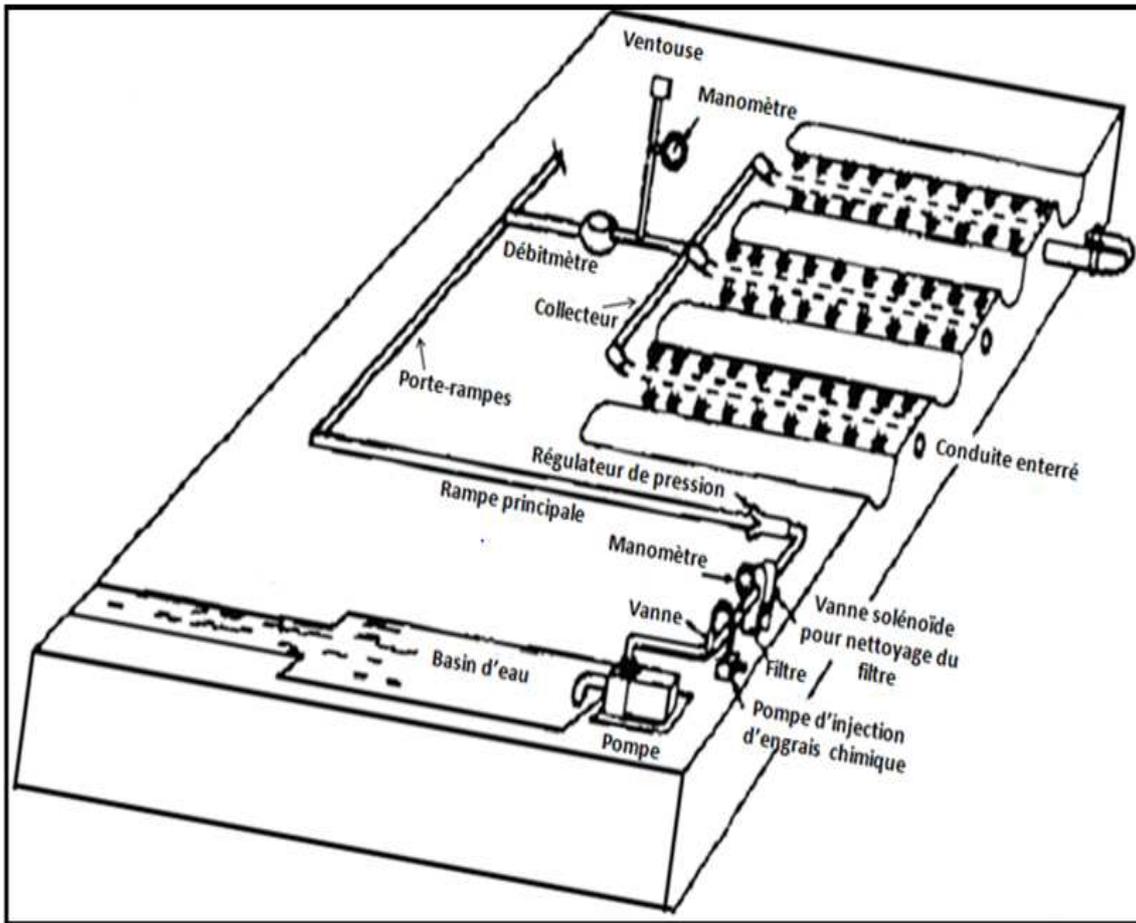


Figure 8 : Dessin schématique du réseau d'irrigation goutte à goutte enterré

Source: D. Reich, R. Godin, J.L. Chávez, I. Broner, 2009

La technique d'irrigation goutte à goutte enterré présente les avantages et les inconvénients suivants :

- Haut degré de contrôle sur l'application de l'eau avec une grande uniformité d'application ;
- Fortes fréquences d'irrigation (la teneur en humidité du sol optimale dans la zone racinaire) ;
- Excellentes performances dans les endroits venteux et arides ;
- Les maladies et l'évaporation sont réduites.
- Le risque de colmatage est élevé ;
- les sels s'accumulent sur le front de mouillage (si l'eau est salée) ;
- Émetteur peut être endommagé ou bloqué par des poils racinaires ;

-Les matières organiques en suspension et des particules d'argile peuvent endommager le système ;

-Un grand nombre de travaux de réparation est causé par les rongeurs qui mâchent les tubes ;

-La machinerie lourde peut endommager les canalisations latérales.

2-7-Technique d'irrigation souterraine innovante avec membrane autorégulante (ARSIT)

2-7-1-Origine

La technique d'irrigation souterraine ARSIT (irrigation technology by auto-regulative subsurface pipes) est une combinaison des avantages de l'irrigation souterraine et l'irrigation avec pot en argile enterré. Les avantages spécifiques de l'irrigation souterraine sont la possibilité de la mécanisation des installations à grande échelle et un cycle de vie plus long, les avantages spécifiques de l'irrigation avec pot en argile enterré sont, son potentiel d'autorégulation qui est une technologie à faible coût et ne demande aucun contrôle sophistiqué.

La combinaison de ces avantages se traduit par un tuyau d'irrigation enterré à membrane semi-perméable avec une capacité d'autorégulation du potentiel hydrique du sol en maintenant une humidité du sol au voisinage de la capacité au champ et en évitant le stress hydrique à la plante. Ce tuyau a un comportement hydrodynamique innovant. La capacité de l'autorégulation qui provient de l'interaction entre les parois du tuyau et le sol. Si le sol est sec, l'eau diffuse à travers les parois du tuyau, par contre si l'humidité du sol augmente, la diffusion de l'eau diminue ou bien s'arrête automatiquement.

La conduite ARSIT de couleur blanche est constituée essentiellement de polypropylène avec un diamètre interne de 0,55 cm et une épaisseur de 0,15 cm (voir figure 9). La conduite ARSIT est hydrophobe (n'absorbe pas l'eau mais la conduit). Elle présente une structure sous microscope similaire à celle de l'éponge avec une porosité de 70 à 80%. Les micropores n'ont pas une forme géométrique régulière mais prennent l'aspect de canaux entremêlés, la figure suivante montre les images de l'observation de la conduite sous microscope.

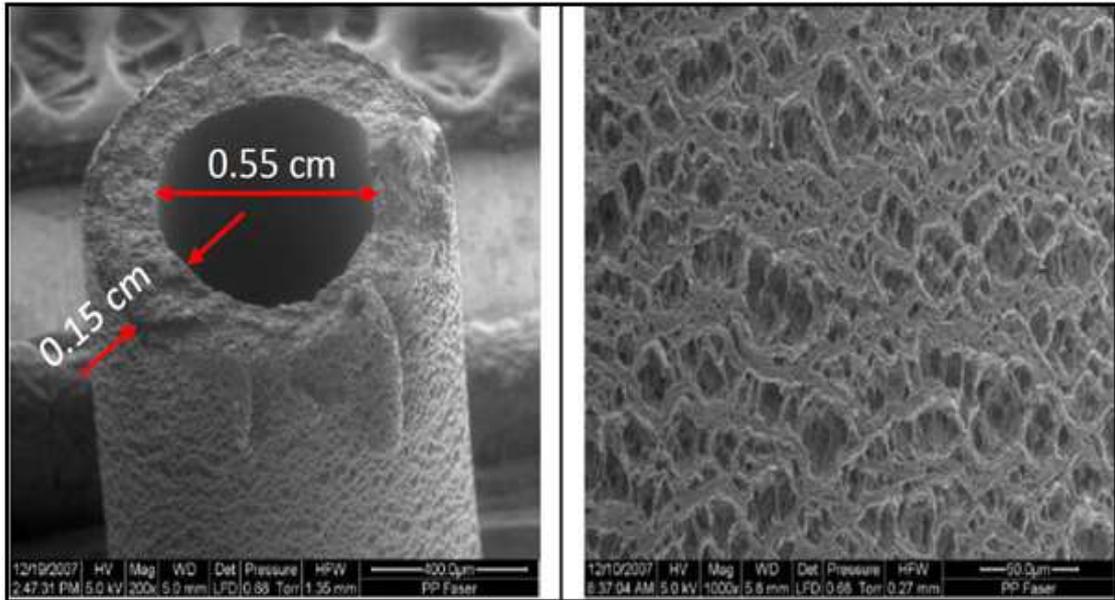


Figure 9 : Dimensions et structure de la conduite ARSIT (Laboratoire BMBF)
Source : Mezzaour, 2012

2-7-2-Essais caractéristiques du mode de fonctionnement de la technique ARSIT

2-7-2-1-Essais en laboratoire:

Plusieurs essais ont été réalisés sur les conduites ARSIT dans le laboratoire à l'université de Kassel Allemagne (2008 à 2009), afin de tester le fonctionnement d'autorégulation de la conduite ARSIT et identifier les paramètres qui influencent le comportement de la conduite. Des expériences sur l'influence de la pression et la température sur le fonctionnement hydraulique de la conduite et aussi des expériences sur la capacité de l'irrigation de la conduite ont été réalisées. Les résultats de ces expériences ont montré que le fonctionnement de l'autorégulation de la conduite est régi par l'hydrophilisation et une pression inférieure à 0,1 bar et que le gel peut bloquer l'autorégulation.

A-Influence de la pression

Une série de valeurs de pressions ont été appliquées sur des conduites ARSIT hydrophilisées et non hydrophilisées, pour déterminer l'influence de la pression sur la conduite ARSIT et distinguer le comportement des deux conduites. La figure 10 présente l'influence de la pression sur le fonctionnement hydraulique d'une conduite ARSIT hydrophilisée et non hydrophilisée.

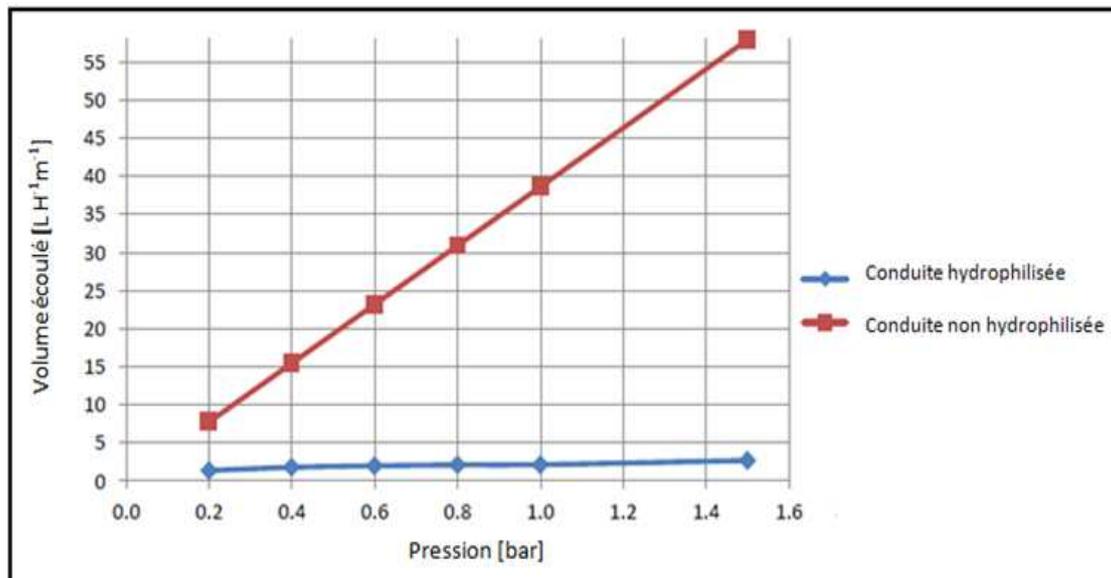


Figure 10: Influence de la pression sur le fonctionnement hydraulique de la conduite ARSIT hydrophilisée et non hydrophilisée (Laboratoire BMBF)

Source : Mezzaour, 2012

D'après le graphe on remarque que les volumes écoulés de la conduite non hydrophilisée sont proportionnels à la pression, avec un volume minimal de 7,5 ml enregistré pour une pression de 0,2 bar et un volume maximal de 57,5 ml enregistré pour une pression de 1,5 bar. Et pour la conduite hydrophilisée on remarque que pour une pression de 0,2 bar le volume écoulé est constant environ de 2 ml, et pour des pressions supérieures à 0,2 bar le volume écoulé par la conduite est supérieur à 2 ml. D'après les résultats de l'expérience le fonctionnement d'autorégulation de la conduite ARSIT est commandé par l'hydrophilisation et une pression inférieure à 0,2 bar. Cependant la pression idéale reste inférieure à 0,1 bar.

B-Influence de la température

L'expérience consiste à exposer la conduite non hydrophilisée aux conditions de gél équivalant à -4°C puis la retirer. Ensuite avec un nombre de répétitions déterminé la conduite est soumise sous différentes pressions tout en mesurant le volume écoulé, d'autre part une conduite hydrophilisée est exposée aussi à des conditions optimales de gél.

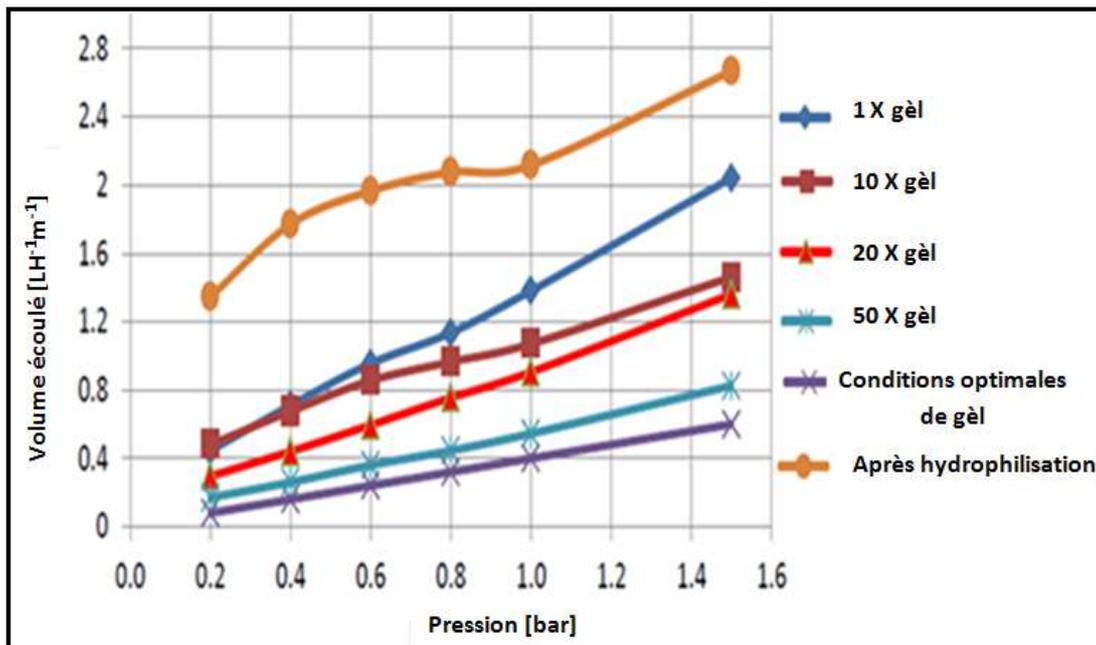


Figure 11 : Influence des basses températures sur le comportement hydraulique de la conduite ARSIT (Laboratoire BMBF)

Source : Mezzaour, 2012

D'après la figure 11 on remarque que plus le nombre de répétitions d'exposition des conduites au gel augmente pour la conduite non hydrophilisée, plus le volume débité par celle-ci diminue, avec un volume de 0,6 ml enregistré pour une pression de 1,5 bar dans des conditions de froid très fort. Concernant la conduite hydrophilisée après son exposition au gèle on constate que le volume écoulé augmente avec l'augmentation de la pression avec un volume minimale de 0,14 enregistré pour une pression de 0,2 bar et un volume maximal de 2,65 ml enregistré pour une pression de 2,65 bar. Les volumes écoulés par la conduite enregistrés dans des conditions de gèle sont plus faibles que les volumes enregistrés en l'absence du gèle (voir figure 12) surtout sur la conduite non hydrophilisée et d'un autre côté les conditions de gèle ont bloqués le fonctionnement d'autorégulation de la conduite hydrophilisée.

C-Test sur la capacité d'irrigation des conduites ARSIT

Une expérience réalisée pour tester la capacité des conduites à l'autorégulation et cela en plaçant une conduite ARSIT de 1 m après hydrophilisation à une profondeur de 30 cm dans un bac (1,25 m x 0,80 m x 0,67 m) rempli de sable limoneux. Le suivi de l'irrigation se fait grâce à des tensiomètres installés à des profondeurs de 10 cm, 30 cm et 50 cm disposés en trois séries. La première série juste à proximité de la conduite, la deuxième série à une

distance de 15 cm par rapport à la conduite et la troisième série à une distance de 35 cm par rapport à la conduite, tout au long de cet essai des mesures de débit ont été effectuées.



Figure 12 : Dispositif expérimental (Laboratoire BMBF)
Source : Mezaour, 2012

Le but de l'essai est de tester la capacité de la conduite à l'autorégulation grâce à la relation débit- tension de l'eau dans le sol. La figure 13 présente la relation entre le débit en fonction de la tension en eau dans le sol.

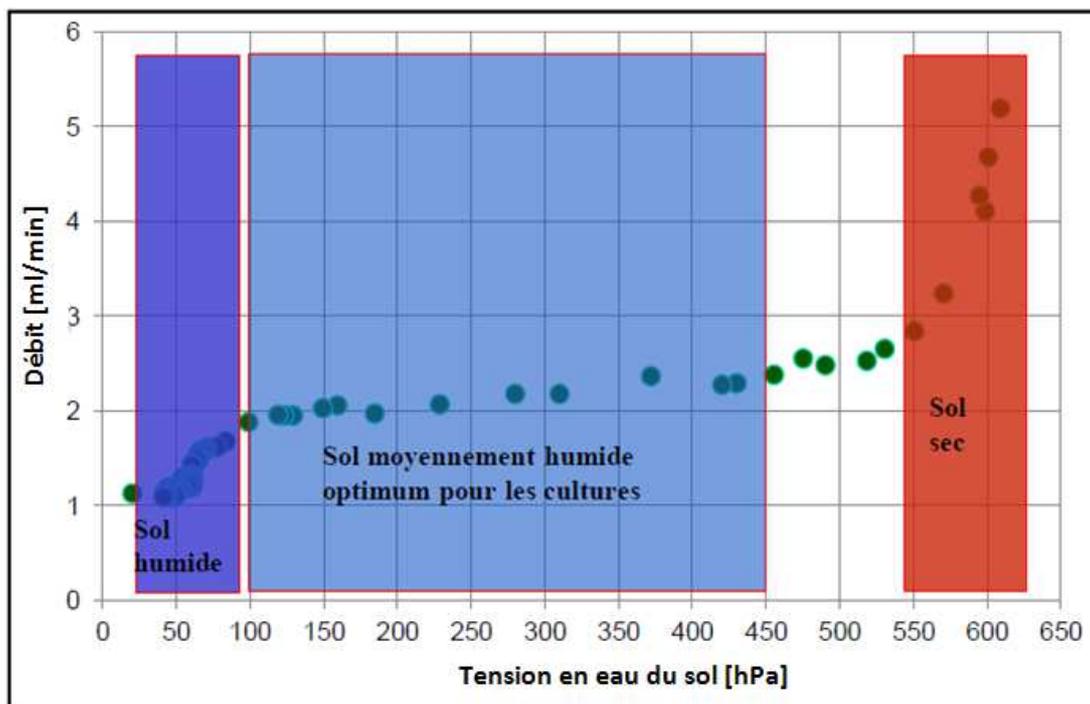


Figure 13 : Courbe du débit de la conduite ARSIT en fonction de la tension de l'eau dans le sol (Laboratoire BMBF) Source : Mezaour, 2012

D'après le graphe le fonctionnement de la conduite ARSIT passe par trois phases. La première phase présente des tensions du sol de 610 à 550 hPa (sol sec) le débit fournit par la conduite se situe de 5,2 à 2,8 ml/min/m. La deuxième phase présente des tensions entre 450 à 100 hPa (sol moyennement humide, optimum pour les cultures) le débit fournit par la conduite varie entre 2,2 et 2 ml/min/m, et la troisième phase des tensions de 100 à 25 hPa (sol humide) le débit fournit par la conduite est inférieur à 2 ml/min/m. Au niveau de l'intervalle de tension 450 à 550 hPa la présence d'une phase de transition de l'évolution du débit qui croit à 2,6 ml/min/m puis décroît à 2,4 ml/min/m et y stagne ensuite, il augmente pour des tensions supérieures à 550 hPa. Donc la conduite ARSIT auto-régularise l'humidité du sol à des tensions comprises entre 100 et 450 hPa (optimum pour les cultures) accompagné par un débit de 2 à 2,2 ml/min/m.

2-7-2-2-Essais de terrain campagne 2011/2012

Dans le cadre de ce projet l'ENSA a initié une première étude sur la technique ARSIT. L'expérience a été effectuée au niveau de la station de l'ITCMI pour la conduite d'irrigation du poivron sous serre. Le but de cette expérience est d'étudier le comportement de la technique ARSIT sur terrain et comparer les résultats découlant de cette étude avec ceux obtenus du suivi d'une irrigation de goutte à goutte (DI) établie dans les mêmes conditions que la technique ARSIT et aussi confronter les résultats trouvés avec ceux réalisés au niveau du laboratoire de l'université de Kassel.

2-7-2-3-Essais de terrain campagne 2012/2013

Une deuxième année d'étude sur la technique ARSIT au niveau de la station expérimentale de l'ENSA pour la conduite d'irrigation de la tomate sous serre. Cette deuxième année d'expérience sur cette technique a permis d'aborder trois aspects. Le premier est de comparer la variation de la réserve en eau entre un système d'irrigation goutte à goutte (DI) et le système ARSIT. Le deuxième thème est d'analyser le fonctionnement de la technique ARSIT dans deux contextes pédoclimatiques différents en Algérie (nord : ENSA et sud : Biskra). Le troisième thème est de comparer les performances de la technique ARSIT avec la technique DI.

3-Conclusion

On a présenté dans ce chapitre les différentes techniques d'irrigation souterraine, en commençant par les techniques les plus anciennes (sans mécanisation) aux techniques modernes (avec mécanisation). On a montré les avantages offerts par chaque technique et les inconvénients rencontrés sur le terrain.

Dans le deuxième volet de ce chapitre on a présenté la technique d'irrigation innovante souterraine ARSIT, avec l'origine de la technique et le principe de fonctionnement des conduites ARSIT. On a exposé les résultats obtenus des essais menés sur la technique ARSIT au laboratoire et aussi les objectifs des différents essais réalisés sur terrain par l'ENSA, pour l'étude de la fiabilité de la technique ARSIT à l'irrigation dans des conditions réelles.

Chapitre 2 : Exigences de la tomate sous serre

La production de la tomate sous serre offre aux agriculteurs la possibilité de la production et la commercialisation de la tomate à des moments où sa production est faible. Cependant la tomate sous serre a des exigences culturelles différentes de la tomate de plein champ. La tomate sous serre nécessite un contrôle régulier et un temps de travail supplémentaire. Elle exige l'observation quotidienne, l'attention au cours de la période de croissance et la maîtrise des facteurs influents tels que : la température, la pollinisation, l'irrigation, la fertilisation et les maladies etc.

1-Origine

La tomate fait partie du genre *Lycopersicon* de la famille des solanacées, celle originaire de la bande côtière de l'ouest de l'Amérique au Sud de l'équateur. Le genre est divisé en deux sous-genres, *Eulycopersicon* et *Eriopersicon*, dont le premier contient l'espèce *Lycopersicon pimpinellifolium* et *Lycopersicon esculentum*. *Lycopersicon pimpinellifolium*, souvent connu sous le nom de tomate groseille, le fruit est extrêmement petit (moins de 10 mm). *Lycopersicon esculentum* contient des types à gros fruits sauvages qui poussent ou sont cultivés comme des cultures annuelles ou vivaces. Le sous-genre *Eriopersicon* est généralement trouvé dans la nature comme des plantes vivaces, avec des fruits verts velus et blanchâtres qui sont les plus attrayants en apparence et en saveur (Papadopoulos, 1991).

2-Cycle biologique de la tomate

2-1-Phase de germination

A température ambiante comprise entre 18 et 24°C la levée s'effectue au bout de 6 à 8 jours. Au dessus du sol apparaissent la tigelle et deux feuilles cotylédonaires simples et opposées. Dans le sol le radicule possède un manchon de poils absorbants bien visible.

2-2-Phase de croissance

Le radicule s'allonge et prend l'aspect d'un filament blanchâtre sur lequel apparaissent des racines secondaires. Les 2 premières vraies feuilles découpées apparaissent vers le 11ème jour. Elles ne sont bien développées que vers le 20ème jour. Au bout de 1 mois environ, il y a

3 à 4 paires de feuilles découpées. Le jeune plant a 15 à 20 cm de hauteur en moyenne et c'est le moment de le repiquer.

2-3-Phase de floraison

La première inflorescence apparaît en deux mois et demi après le repiquage. Les autres inflorescences vont apparaître au-dessus de la première avec entre chaque inflorescence, un nombre variable de feuilles : de une à quatre. La floraison s'échelonne donc de bas en haut. La floraison dure 1 mois à 1 mois et demi, c'est-à-dire de deux mois et demi à trois et demi mois après le repiquage.

2-4-Pollinisation

La pollinisation nécessite l'intervention des agents comme, le vent ou certains insectes comme le bourdon qui est capable de faire vibrer les anthères et libérer le pollen (Chaux et Foury, 1994).

2-5-Phase de fructification/maturation

Elle débute durant la phase de floraison. Elle commence par la nouaison des fruits de l'inflorescence de base et se poursuit par les inflorescences supérieures au fur et à mesure de l'apparition des inflorescences et de la fécondation des fleurs. Les fleurs se développent, grossissent et après avoir atteint leur taille définitive, elles commencent par perdre leur coloration verte au profit du jaune puis au rouge de plus en plus accentué.

3- Exigences pédo-climatiques de la tomate sous serre

3-1-Température

La tomate est une plante qui a besoin de beaucoup de chaleur pour assurer le cycle complet de sa végétation et qui peut surmonter un certain intervalle de températures, mais en dessous de 10°C et au-dessus de 38°C les tissus des plantes seront endommagés (Naika et al, 2005). La germination des graines est optimum pour des températures comprises entre 18 et 24°C. La croissance de la tomate demande des températures moyennes situées entre 21 et 27°C le jour et 10° et 20°C la nuit. A partir de 13°C, la croissance est arrêtée. Pendant la phase de floraison, la température joue un rôle très important dans la réussite de la fécondation. Il faut 18 à 24°C durant le jour et 14 à 15°C durant la nuit. Pendant la phase de

maturation, il faut avoir une température d'environ 18°C la nuit et 27°C le jour pour avoir des fruits qui mûrissent rapidement et acquièrent une belle coloration.

3-2-Lumière

La lumière est un facteur très important pour la croissance des plantes et l'intensité de la lumière affecte la couleur des feuilles, la mise à fruits et la couleur des fruits (Naika et al, 2005). La matière végétale est produite par le procédé de la photosynthèse et en règle générale, le taux de photosynthèse est lié à l'intensité lumineuse. L'importance de la lumière dans la production de tomates est en hiver, quand il est à court d'approvisionnement. Dans les courtes journées de fin de l'automne, en hiver et au début du printemps, le développement des bourgeons est arrêté ils ne parviennent pas à produire des fleurs et des fruits. L'augmentation de l'intensité de la lumière naturelle à la maturation de la culture de la tomate est avantageuse, à condition que les plantes soient bien alimentées en eau.

3-3-Humidité relative

L'humidité relative optimale pour les tomates sous serre est de 60-70 %, elle permet d'avoir des fruits de bons calibres, avec moins de gerçures. La croissance en général est favorisée par une humidité relative élevée pendant la journée et peut également améliorer la nouaison. Cependant, une humidité relative élevée, quand elle n'est pas gérée correctement, peut facilement conduire à une condensation de l'eau sur les plantes et le développement des maladies. L'humidité atmosphérique doit être de 76% lors de la germination, 70 à 80% durant l'élevage des plants, 70 à 80% lors du développement des fruits (Benchaala, 1983).

3-4-Mouvement d'air

La circulation d'air horizontale est bénéfique pour la productivité des cultures et la conservation de l'énergie. Une vitesse d'air d'environ 1 m/s provoque un faible mouvement sur les feuilles ce qui est recommandé. La circulation d'air horizontale permet de minimiser les gradients de température de l'air dans la serre, enlève l'humidité à partir de la partie inférieure de la serre (sous le feuillage), répartit l'humidité dans le reste de la serre, aide le dioxyde de carbone à partir du sommet de la serre et se déplacer vers la surface foliaire où il

est repris et fixé dans la photosynthèse, et peut même aider à la pollinisation (Papadopoulos, 1991).

3-5- Sol

3-5-1-Structure et texture

La tomate demande des sols profonds, frais mais humides, riches en humus et en matières fertilisantes, légers et légèrement acides. Dans les sols lourds, il faut prévoir un drainage suffisant. La qualité du sol n'est pas prédominante pour la tomate, il lui suffit d'avoir un sol profond et bien drainé. Les sols argileux ne donnent que de très faibles rendements (Laumonier, 1979).

3-5-2-Acidité du sol (pH)

La tomate est une culture indifférente au pH du sol et le rendement varie peu avec la variation du pH. Sur des sols à pH basique (pH>7) certains micro-éléments restent peu disponibles à la plante (Fe, Mn, Zn, Cu). Dans ce cas, une correction des engrais est nécessaire. Cependant il faut vérifier chaque fois le pH de la solution nutritive, la plage optimale de pH pour la solution nutritive est de 5,5 à 6,8. (Kahlaoui, 2012).

4-Pratiques culturales

4-1-Irrigation

La tomate est une culture exigeante en eau, ses besoins sont estimés à 5000 m³/ ha avec des apports conséquents en période de grossissement du fruit (ITCMI, 2010). Sous abri, il est conseillé d'utiliser le goutte à goutte. Les besoins en eau de la culture peuvent être couverts par des apports de 25 % des besoins globaux durant la phase végétative, 50 % durant le pic des cueillettes et 25 % à la dernière phase de la culture. Le sol doit être toujours porté à sa capacité au champ. Une erreur dans la conduite de l'irrigation provoque l'éclatement des fruits. Avec un équipement supplémentaire (pompe doseuse et bacs), il est facile d'introduire la fertigation dans l'exploitation. Les apports d'eau et des éléments minéraux seront assurés avec une cadence permettant à la culture de se développer convenablement. Les pertes de fertilisant par lessivage seront également portées à leurs minima.

4-2-Fertilisation

Un apport de fond comprend 50-60 T/ha de fumier et une fumure minérale dont les doses doivent être déterminées en fonction de la richesse du sol ; généralement on apporte 100 kg N/ha + 200 kg P₂O₅/ha + 250 kg/K₂O. En couverture, par quinzaine, les apports sont les suivants: en phase végétative, 50 kg N/ha avec un équilibre de N-P₂O₅-K₂O de 1-0,5-0,9. En période de début floraison, l'apport est le suivant: 30 kg N/ha avec un équilibre de 1-0,4-1,2. En période de cueillettes, l'équilibre suivant doit être adopté: 1-0,3-(1,8 à 2) avec une dose de N de 30 kg/ha. Au cours de la culture, des pulvérisations d'engrais foliaires doivent être appliquées régulièrement tous les mois ou en cas de nécessité. Lorsque la fertigation est utilisée, les mêmes doses peuvent être apportées en les divisant par 15 jours afin de les adapter aux apports quotidiens.

4-3-Principaux ennemis de la culture et méthodes de lutte

Il faut surveiller les nématodes, les taupins, les vers gris, les pucerons, la mineuse, les acariens en temps chaud, les maladies cryptogamiques et la bactériose. Les traitements phytosanitaires doivent être appliqués d'une manière préventive afin d'éviter l'attaque de tout agent pathogène. Il faut, cependant éviter l'excès afin de sauvegarder l'environnement et d'économiser les charges. Les produits phytosanitaires doivent être alternés afin d'éviter le phénomène d'accoutumance aux ennemis de culture.

4-4-Récolte, manipulation du produit et conditions d'une bonne conservation

La cueillette peut être échelonnée sur six mois (Novembre à Mai). Les fruits cueillis doivent être manipulés avec soin afin d'éviter leur blessure. Le rendement varie de 80 à 110 t/ha (ITCMI, 2010) et selon la qualité de l'entretien consacré à la culture. En ce qui concerne la conservation, il faut rappeler que la tomate produite sous serre doit être vendue en frais. Lors d'un transport à une région lointaine, il est conseillé d'entreposer les fruits dans un local frais (8-10 °C et 90 % HR) en attendant l'expédition.

5-Culture de la tomate sous serre en Algérie

5-1-Zone de production en Algérie

La tomate est une plante des régions chaudes, peut être cultivée dans toutes les régions d'Algérie. Le tableau 1 représente les zones de la production de la tomate

Tableau 1 : Zone de production de la tomate en Algérie

| Tomate | Période de plantation | Zone de production |
|---------------------|-----------------------|---|
| Tomate maraîchère | Arrière saison | Littoral centre et littoral ouest |
| | Primeur | Littoral. Sous serres : littoral et sud |
| | Saison | toutes les régions du pays |
| Tomate industrielle | Mars- Avril- Mai | Est : Annaba, Taref, Skikda, Jijel, Guelma |
| | | Centre : Boumerdes, Tipaza, Blida, Ain defla, Chlef |
| | | Ouest : Relizane, Mostaganem, SBA, Ain temouchent |

Source : ITCM, 2010

5-2-Principales variétés cultivées en Algérie

-Variétés de tomate maraîchère : Agora, Zahra, Marmande VR, Top 48, Sahara, Chorouk, El Kamar, Doucen ...

-Variétés de tomate industrielle : Universal mech, Rio Grande, El gon, Castlong, Heintz, Sabra, Zénith, Nema, Pico de Anéto, Roma vf...

5-3- Production de la culture de la tomate sous serre en Algérie

La figure 14 présente l'évolution des superficies, des productions et des rendements de la tomate sous serre (2000-2012)

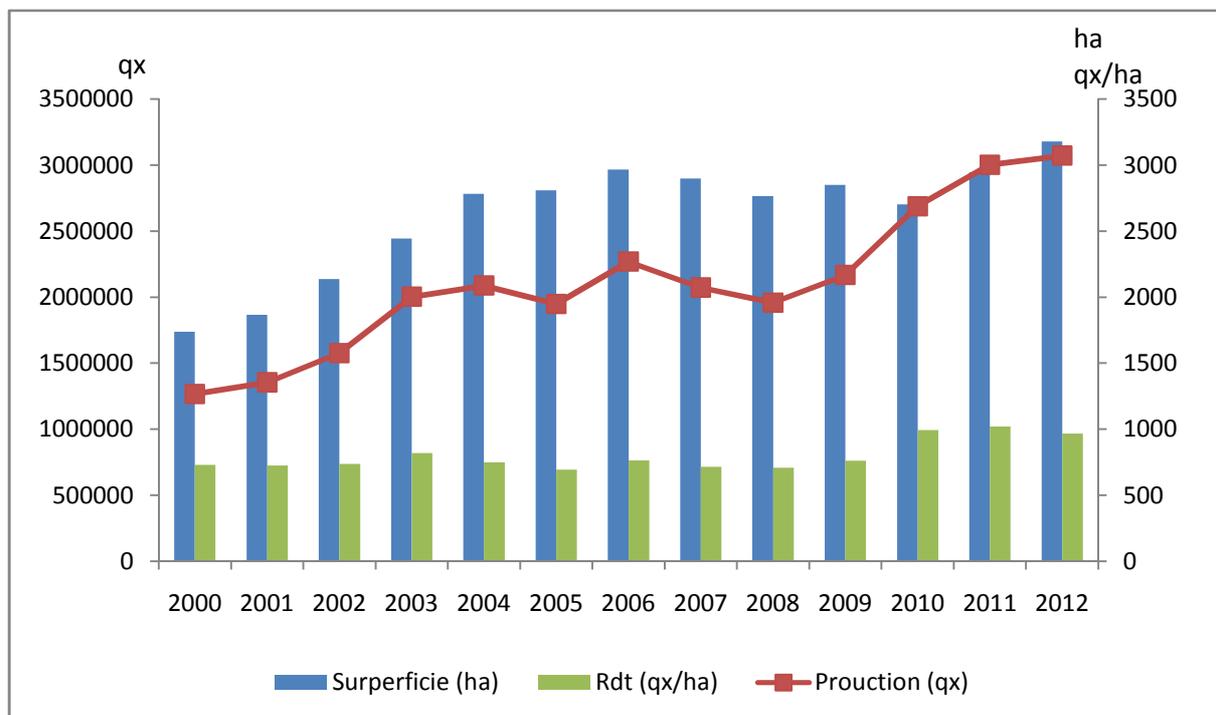


Figure 14 : Evolution des superficies, des productions et des rendements de la tomate sous serre. Source : MADR, 2013

Les valeurs montrent une augmentation de la superficie avec 1737,11 ha en 2000 à 3179,25 ha en 2012 et qui a engendré une augmentation de la production de la tomate avec 1266560 qx en 2000 à 3070566 qx en 2012, cette augmentation de la production n'est pas liée uniquement à l'augmentation de la superficie mais aussi à l'amélioration progressive et la maîtrise des techniques culturales.

Chapitre 3 : Transferts d'eau dans un sol cultivé

Un sol cultivé est un milieu de croissance pour les plantes, il fournit aux plantes un réservoir d'eau et de matière minérale et organique essentiel à leur développement. Il transforme le flux irrégulier d'eau issu des précipitations et d'irrigation en un flux généralement continu pour les racines des plantes. Ainsi la plante a à sa disposition l'eau nécessaire à ses fonctions physiologiques. Les processus de transferts d'eau dans un sol cultivé reposent sur les règles de la zone non saturée dont le sol est considéré comme un milieu poreux et il apparaît comme un complexe dynamique à trois phases : liquide, solide et gazeuse. La dynamique de transferts d'eau dans un sol cultivé découle de la variabilité temporelle et spatiale de la phase liquide de sol, duquel cette variabilité est fonction des propriétés du continuum sol-plante-atmosphère.

1-Caractéristiques d'un sol cultivé

1-1-Représentation physique du sol

Le sol est constitué d'un volume de solides et d'un volume de vides, le volume des solides est constitué des différents minéraux et des particules de matière organique et les vides occupent les espaces libres entre les particules (minéraux et matière organique). À son tour, le volume des vides est divisé en une phase liquide et gazeuse. La phase liquide est constituée principalement de l'eau et des éléments (sels, nitrates, etc.) en solution dans celle-ci. La phase gazeuse est constituée d'azote gazeux (N_2), d'oxygène (O_2), de gaz carbonique (CO_2), de vapeur d'eau et d'autres gaz (CH_4 , H_2S , etc).

La phase solide est composée par des grains minéraux (sable, limon, argile) et organique de tailles très variables, cette phase est caractérisée par sa texture et sa structure. La texture décrit la distribution des grains entrant dans sa composition et permet de définir une classification du sol. Les différentes classifications aboutissent généralement à une représentation sous forme de triangle dont le plus utilisé en physique du sol est celui de l'USDA. La structure du sol définit l'arrangement complexe des grains dans la géométrie de l'espace poral. C'est donc une caractéristique dynamique (activité biologique, travail du sol, etc.) qui détermine le réseau poral offert à l'écoulement des fluides dans le sol (NDIAYE, 2000). Contrairement à la texture, il n'existe pas de paramètres physiques simples

permettant une classification des sols selon leur structure. En général 3 types de structures de sol sont distingués : à particules isolées, massive et en agrégats.

1-2- Stock d'eau du sol

1-2-1-Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau permet de définir les entrées et les sorties en eau dans un système sol. Ce système prend en considération la quantité d'eau initialement présente dans le sol (S_{hi}) en ajoutant les apports de surface sous forme de précipitations (P_h), d'irrigations (I_h) et de ruissellement (R) venant d'autres parcelles, et les apports dus aux remontées capillaires (R_c). Cette masse d'eau n'est conservée que partiellement par le sol, une quantité est prélevée par la culture ETR (évaporation réelle), et le reste est drainé vers les couches profondes du sol (D_h) ou ruisselle en surface (R). Ainsi, le stock final d'eau dans le sol (S_{hf}) peut s'écrire :

$$S_{hf} = S_{hi} + P_h + I_h + R_c - ETR - D_h \pm R \dots \dots \dots (01)$$

1-2-2-Teneur en eau du sol

Deux variables peuvent être utilisées pour définir la quantité d'eau présente dans un milieu poreux non saturé : la teneur en eau volumique et le degré de saturation.

-La teneur en eau volumique ou humidité volumique(θ)

Dans un volume de sol donné, l'eau n'occupe qu'une fraction de ce volume, cette fraction, appelée teneur en eau ou humidité volumique. La teneur en eau volumique varie entre une valeur minimale, la teneur en eau résiduelle θ_r , et une valeur maximale, la teneur en eau à saturation θ_s .

$$\theta = \frac{\text{volume d'eau contenu dans un Volume Élémentaire Représentatif(VER)}}{\text{volume totale de l'échantillon}} \dots \dots \dots (02)$$

-Le degré de saturation ou indice de saturation (S_w) :

Cette grandeur exprime le volume des pores occupé par l'eau, est défini comme le rapport du volume d'eau au volume des pores. Elle varie entre un minimum résiduel et la valeur de 100%.

$$S_w = \frac{\text{Volume d'eau dans le VER}}{\text{volume des vides dans le VER}} \dots\dots\dots (03)$$

$$0 \leq S_w \leq 1$$

1-2-3- Potentiel de l'eau du sol (charge hydraulique)

En un point donné, l'énergie potentielle de l'eau dans le sol est définie principalement par deux types d'énergie potentielle : celle due à la différence de profondeur entre une profondeur de référence (la surface) et la profondeur du point considéré et celle due à la structure même de la matrice poreuse du sol. Cette énergie totale ramenée à un poids d'eau unitaire donne la charge hydraulique notée :

$$H = h - z \dots\dots\dots (04)$$

Où :

H : la charge hydraulique

h : la charge matricielle ou succion

Z : la profondeur verticale orientée positive vers le bas

1-3- Propriétés hydrodynamiques de la zone non saturée

1-3-1-Courbe de rétention du sol $h(\theta)$

La charge matricielle est directement reliée à la répartition entre air et eau dans les pores du sol, ainsi il existe une relation entre la pression matricielle et la teneur en eau du sol. Cette relation dépend du type de sol. Elle est différente entre une phase d'absorption (humectation) de l'eau par le sol et une phase de désorption (dessèchement) et doit donc être définie par une relation à hystérésis.

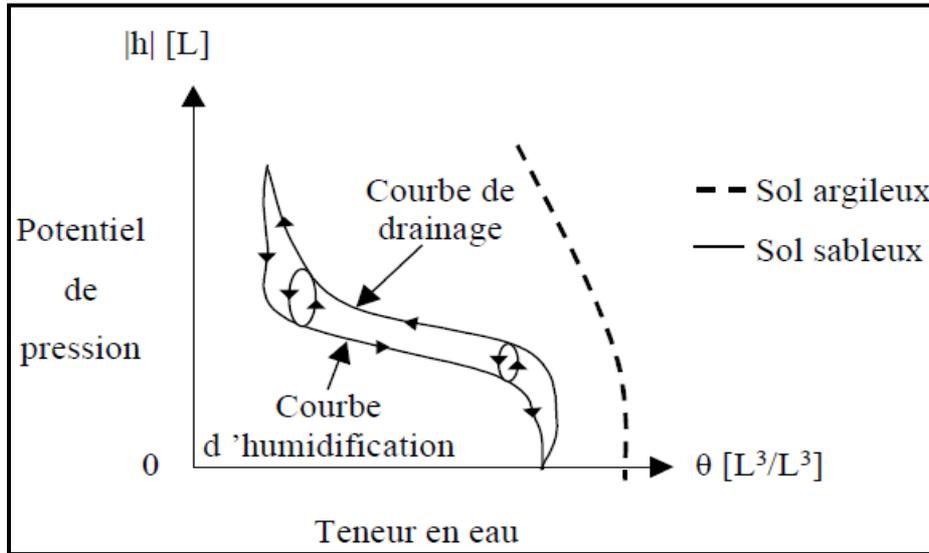


Figure 15 : Influence de la texture et de la structure sur la relation $h(\theta)$ et effet d'hystérèse

Source : Ghouli, 2009

Cependant, on considère généralement que cette relation est une fonction, elle a souvent une forme proche de la fonction $|h| = a \theta^b$ avec a et b des paramètres empiriques. Parmi les représentations les plus fréquemment utilisées, on trouve celle de Brooks et Corey (1964) (05) et celle de van Genuchten (1980) (06)

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_A}{h}\right)^\lambda \dots\dots\dots (05)$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \dots\dots\dots (06)$$

Avec:

θ_r : la teneur en eau résiduelle en [L³.L-3]

θ_s : la teneur en eau à saturation en [L³.L-3]

h_A : la pression d'entrée d'air en [L]

α : paramètre empirique en [L-1]

λ, n, m : paramètres empiriques en [-]

1-3-2-Conductivité hydraulique

Selon la loi de Darcy, est l'aptitude du milieu poreux à transmettre l'eau qu'il contient pour un état de saturation donné. La diminution de la teneur en eau entraîne une diminution rapide de la conductivité. En milieu saturé, la conductivité hydraulique est constante et égale

à sa valeur maximale (la conductivité à saturation). La figure 16 illustre les relations liant la conductivité au potentiel de pression et à la teneur en eau, lesquelles sont non linéaires et dépendent du type de sol considéré. La relation $K(h)$ est aussi sujette à l'hystérésis.

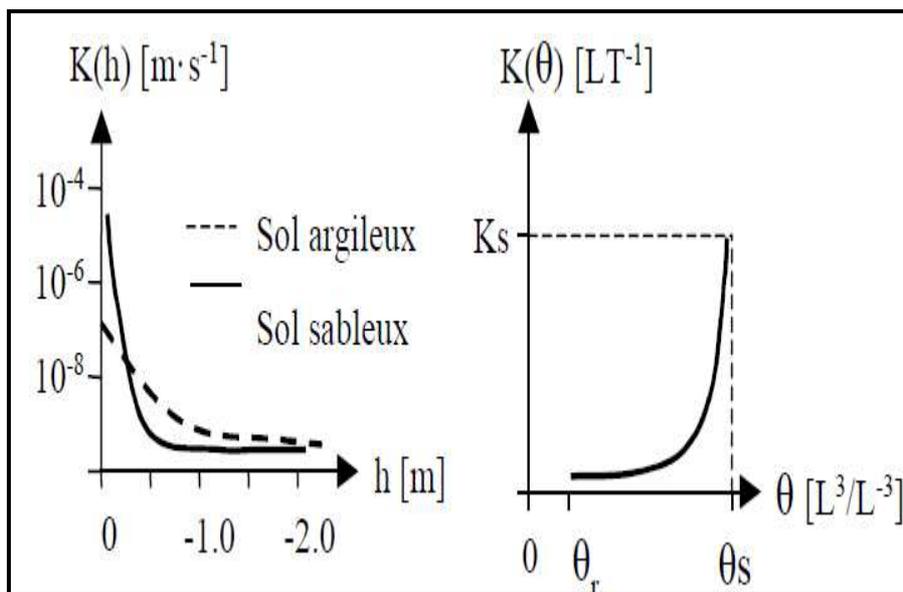


Figure 16 : Allure générale des fonctions $K(h)$ et $K(\theta)$. (Source : Ghoul, 2009)

Les équations 07, 08 et 09 décrivent la conductivité hydraulique dans un milieu poreux, en se basant sur des données expérimentales (Crevoisier D, 2005). Les équations 07 et 08 dérivent des fonctions de rétention en eau du sol, et l'équation 09 est développée par Gardner(1956).

$$\frac{k(h)}{k_s} = \left(\frac{h_A}{h}\right)^v \dots\dots\dots (07)$$

$$\frac{k(h)}{k_s} = \theta_e^a(h) \left[1 - \left(1 - \theta_e^m(h) \right)^m \right]^b \dots\dots\dots (08)$$

$$\frac{k(h)}{k_s} = e^{-\frac{h-h_A}{\lambda_c}} \dots\dots\dots (09)$$

Avec :

K_s : la conductivité hydraulique à saturation en [L.T-1]

$\theta_e(h)$: la fonction de rétention du sol du modèle de van Genuchten en [-]

v, a, b : paramètre empirique en [-]

λ_c : la longueur capillaire en [L]

2- Loi de l'écoulement en milieu poreux non saturé

2-1-Loi de Darcy en milieu poreux non saturé

La loi de Darcy généralisée en milieu poreux saturé reste applicable en milieu poreux non saturé avec une conductivité hydraulique qui varie avec la teneur en eau (θ) et la charge de pression (h). La loi de Darcy (1856) s'écrit :

$$q = - K (\theta) \nabla(H) = - K (\theta) \nabla(h - z) = - K (\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial z}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (10)$$

q : densité de flux volumique (volume d'eau par unité de section d'écoulement par unité de temps) en $[L^3.L^{-3}]$

$K(\theta)$: conductivité hydraulique en $[LT^{-1}]$

H : charge hydraulique, définie par $H=h+z$

2-2-Equation de Richards

L'équation générale de l'écoulement ou l'équation de Richards est obtenue en combinant l'équation de Darcy avec celle de la conservation de la masse.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K (\theta) \nabla(h - z)] \dots \dots \dots (11)$$

L'équation de Richards peut prendre deux formes :

-La forme capacitive : l'équation est résolue en terme de charge de pression (h) en introduisant la capacité capillaire $c(h)$

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K (h) \nabla(h)] - \left(\frac{dK (h)}{dh} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (12)$$

-La forme diffusivité : l'équation est résolue en terme de teneur en eau en introduisant la diffusivité $D(\theta)$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [(D (\theta) \nabla(\theta))] - \left(\frac{dD (\theta)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (13)$$

Partie II

Matériels et méthodes

1-Introduction

Un système d'irrigation parfait est caractérisé par une application correcte des doses d'irrigation, une minimisation des pertes d'eau et une meilleure uniformité d'arrosage. On peut évaluer les performances d'une irrigation en termes d'efficacité et d'uniformité. Pour le système d'irrigation goutte à goutte (DI) son efficacité est définie comme le rapport entre le volume d'eau stocké dans la zone racinaire et celui délivré par l'irrigation et pour l'uniformité est mesurée par sa capacité à appliquer le même volume d'eau pour chaque plant. Cependant l'évaluation des performances d'irrigation de la technique ARSIT (efficacité et uniformité) sont estimées par d'autres paramètres, qui sont l'humidité du sol et les tensions en eau du sol qui doivent être au voisinage de la capacité au champ.

A fin de vérifier cela on a adopté un protocole expérimentale qui nous permettra d'évaluer le comportement de la technique ARSIT à l'irrigation dans des conditions réelles et la comparer avec l'irrigation goutte à goutte (DI). Le protocole expérimental consiste à mettre la technique ARSIT et DI sous serre pour l'irrigation de la tomate tout en effectuant des suivis des paramètres climatiques sous serre, des mesures hydrauliques et des mesures agronomiques.

2-Présentation de la zone d'étude

2-1-Situation géographique de la zone d'étude

On a réalisé notre étude dans deux serres de l'unité expérimentale n°2 au niveau de la station expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure agronomique d'El-Harrach. La station expérimentale se situe à 24 m d'altitude, avec une latitude de 36°N43'et une longitude de 3°E08'. L'Ecole Nationale Supérieure agronomique (ENSA) est limitée au nord par l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) et à l'Est par Institut Technique des Grandes Culture (ITGC) et l'Ecole Polytechnique d'architecture et d'Urbanisme (EPAU) et au Sud par la station horticole de l'ENSA, et l'annexe de l'Ecole Nationale Vétérinaire (ENV), selon la figure 17.

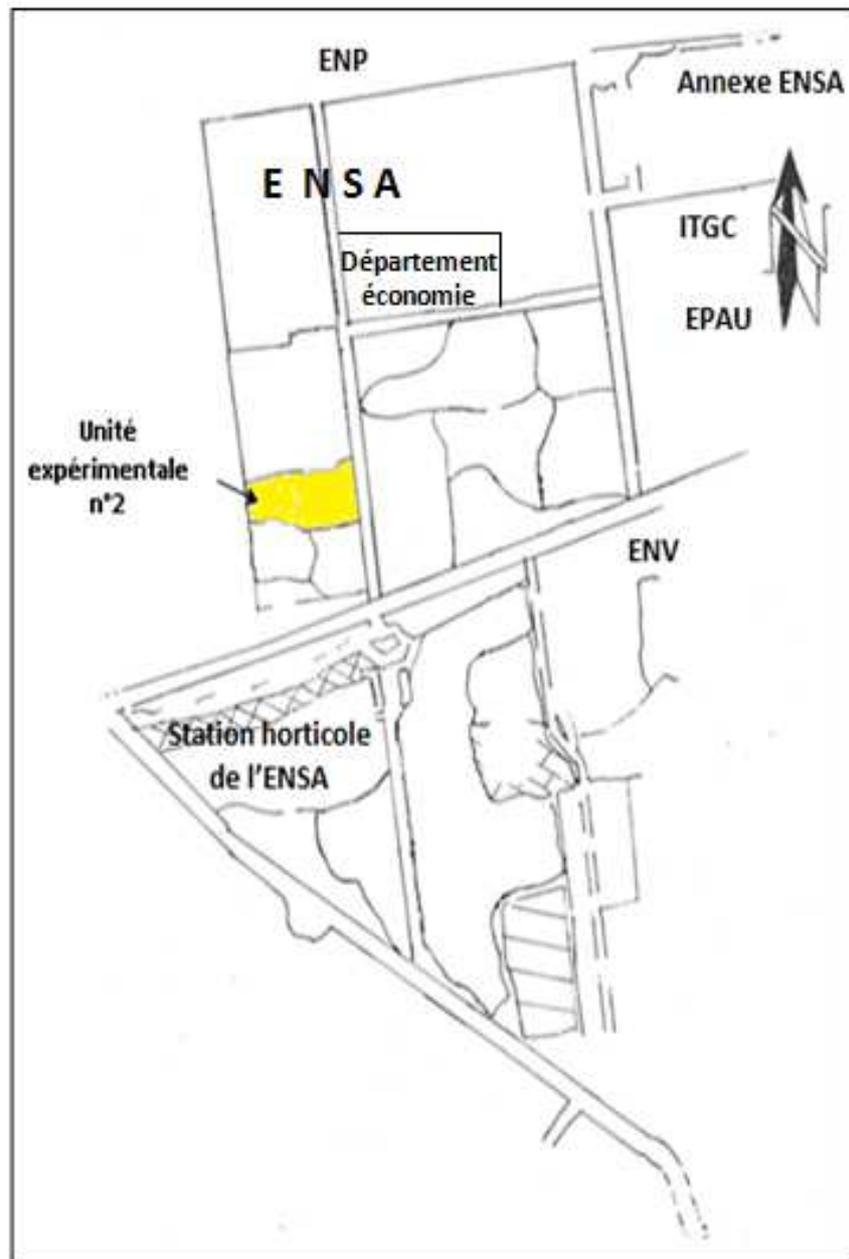


Figure 17: Station expérimentale de l'ENSA au 1/4000

Source : Abib et Haddab, 1995

2-2-Etude climatique de la zone d'étude

La station expérimentale de l'ENSA fait partie du sahal côtier Est de la Mitidja, son climat de type méditerranéen à étage bioclimatique sub-humide caractérisé par un hiver froid et humide et un été chaud et sec. A fin de caractériser le climat de la zone de l'étude on a effectué une étude sur les paramètres climatiques en plein champs (précipitation, température, humidité relative et vitesse du vent).

2-2-1-Précipitations

Le tableau 2 présente les pluviométries moyennes mensuelles enregistrées sur une période de 22 ans (1990 - 2011) dans la station de Dar El Beida.

Tableau 2: Précipitations moyennes mensuelles (1990 – 2011) Station Dar El Beida

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Total |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|
| Nombre Jours de pluie | 6 | 9 | 11 | 12 | 12 | 10 | 9 | 9 | 7 | 2 | 2 | 3 | 92 |
| Pluie moyenne (mm) | 30 | 54 | 98 | 88 | 82 | 65 | 52 | 56 | 42 | 6 | 3 | 11 | 587,5 |

Source : INSID, 2013

D'après le tableau 2 la pluviométrie annuelle moyenne est de l'ordre de 587 mm, le mois le plus pluvieux est novembre avec 98 mm (11 jours de pluie), et juillet représente le mois le plus sec (03 mm).

2-2-3-Températures

Le tableau 3 présente les températures moyennes mensuelles enregistrées sur une période de 22 ans (1990 - 2011) dans la station de Dar El Beida.

Tableau 3 : Températures moyennes mensuelles (1990– 2011) Station Dar El Beida

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août |
|------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T min (°C) | 17,8 | 14,4 | 9,8 | 7,1 | 5,8 | 5,6 | 7,4 | 9 | 12,9 | 16,3 | 19,2 | 20,2 |
| T max (°C) | 29,7 | 26,2 | 21 | 17,9 | 17,1 | 17,6 | 19,5 | 21,5 | 24,8 | 28,7 | 31,3 | 32,7 |
| T Moy (°C) | 23,6 | 19,9 | 15 | 11,9 | 10,7 | 11,2 | 13,4 | 15,1 | 18,9 | 22,8 | 25,5 | 26,3 |

Source : INSID, 2013

Ce tableau, montre que les températures en hiver sont modérées et en été sont élevées. Les températures maximales sont enregistrées au mois d'août avec une valeur moyenne de 32,7°C, et les températures basses se manifestent au mois de février avec une valeur moyenne de 5,6°C.

2-2-4-Humidité relative

Le tableau 4 présente les humidités relatives moyennes mensuelles enregistrées sur une période de 22 ans (1990 - 2011) dans la station de Dar El Beida.

Tableau 4 : Humidité relative moyenne (1990 – 2011) Station Dar El Beida

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | HRmoy |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|
| HR % | 70 | 73 | 76 | 78 | 79 | 80 | 76 | 73 | 73 | 69 | 69 | 67 | 73,58 |

Source : INSID, 2013

D'après le tableau l'état hygrométrique de l'air est moyen à fort durant toute l'année, varie de 69 à 80%, respectivement pour les mois d'août et décembre, avec une moyenne annuelle de 71,5 %.

2-2-5-Vitesse du vent

Le tableau 5 présente les vitesses du vent moyennes mensuelles enregistrées sur une période de 22 ans (1990 - 2011) dans la station de Dar El Beida.

Tableau 5 : Vitesse moyenne du vent (1990 – 2011) Station Dar El Beida

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Vmoy |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| V (m/s) | 2,5 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,3 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 2,6 | 2,8 | 2,7 | 2,6 | 2,51 |

Source : INSID, 2013

Selon la nomenclature climatologique, les vitesses du vent enregistrées sont modérées tout au long de l'année. La vitesse moyenne annuelle est de l'ordre de 2,5 m/s

2-2-6-Evapotranspiration potentielle (ETP)

Le tableau 6 présente les évapotranspirations potentielles moyennes mensuelles calculées en utilisant la formule de Penman.

Tableau 6 : Evapotranspiration potentielle (ETP)

| MOIS | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Juil | Août | Totale |
|----------|-------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|-------|-------|------|--------|
| ETP (mm) | 117,2 | 75,9 | 38,8 | 25,3 | 27,2 | 40,6 | 74 | 99,5 | 131,1 | 161,6 | 179,9 | 166 | 1137,1 |

Source : INSID, 2013

L'évapotranspiration atteint son maximum au mois de juillet (179,9 mm), et au mois de décembre elle est à son minimum 25,3 mm.

2-3- Caractéristiques pédologiques

Nous avons réalisé notre expérience dans deux serres situées dans l'unité expérimentale n°2 de la station expérimentale de l'ENSA.



Figure 18 : Localisation des serres à la station expérimentale de l'ENSA

Selon Ourkhou (2011) les sols de l'unité expérimentale n°2 sont classés comme des sols calcimagnésiques carbonatés, bruns calcaires à encroustement calcaire. Le tableau 7 résume toutes les propriétés physique et chimique des sols de l'unité expérimentale n°2.

Tableau 7 : Propriétés physique et chimique des sols de l'unité expérimentale n°2

| Profondeur (cm) | 00-20 | 20-40 | Moyenne 00-40 | |
|-------------------------------------|-------------|-----------|---------------|-------|
| Calcaire total (%) | 1,55 | 0,43 | 0,989 | |
| CE (ds/m) | 0,26 | 0,28 | 0,27 | |
| pH _{eau} | 7,95 | 8,1 | 7,98 | |
| Matières organiques (%) | MO (totale) | 2,64 | 1,05 | 1,85 |
| | MO (liée) | 1,80 | 1,82 | 1,8 |
| | MO (libre) | 0,85 | 0,85 | 0,85 |
| Granulométrie (%) | A | 31,85 | 32,25 | 32,05 |
| | L.F | 20,5 | 20,95 | 20,73 |
| | L.G | 19,35 | 16,3 | 17,83 |
| | S.F | 15,1 | 12,05 | 13,58 |
| | S.G | 11,7 | 14,45 | 13,1 |
| Triangle textural USDA | Clay Loam | Clay Loam | Clay Loam | |
| Da | 1,5 | 1,44 | 1,47 | |
| Dr | 2,63 | 2,50 | 2,56 | |
| P (%) | 42,85 | 42,45 | 42,65 | |
| Humidité à CC, %pondérale | 21 | 22,15 | 21,58 | |
| Humidité à Pf, %pondérale | 14,50 | 15,45 | 14,98 | |
| Humidité à saturation, % pondéral e | 47,85 | 42,90 | 45,38 | |

Source : Ourkhou, 2011

3-Matériels

3-1-Description du dispositif expérimental

Les deux techniques ARSIT et DI sont installées dans les deux serres (serre n°1 et serre n°2). Les deux serres ont une structure métallique recouverte d'un film plastique en polyéthylène et avec une superficie de 240 m² et de dimensions (30×8 m). À l'intérieur des serres nous avons installé les équipements suivants (figure 19, 20 et 22):

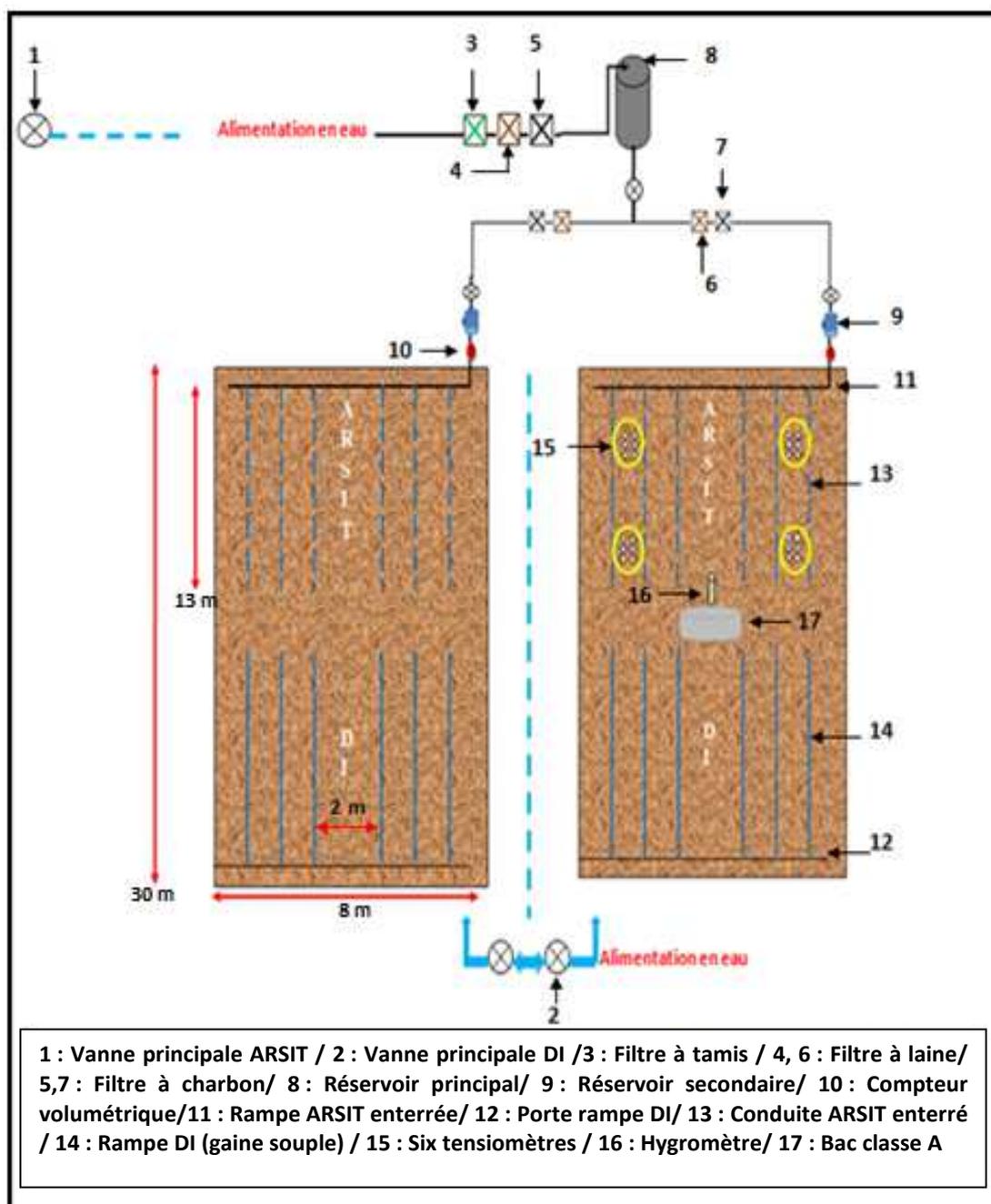


Figure 19 : Schéma représentatif du dispositif expérimental

3-1-1-Réseau d'irrigation de surface DI

Le réseau d'irrigation superficiel DI est installé le 11/02/2013 sur la moitié de la superficie totale de chaque serre (120m²). L'installation de DI est composée de (figure20) :

- Six gaines perforées chaque 10 cm sur une longueur de 13 m (6 ligne : 1, 2, 3, 4, 5, 6) et une distance de 1 m entre chaque conduite installée dans chaque serre (12 gaines), et avec un débit nominal du goutteur de 1,5 l/h et une pression nominale de 1 bar (données du fabricant).
- Un porte-rampes en polyéthylène d'une longueur de 10 m et un diamètre de 25 mm dans chaque serre.
- Une vanne principale pour contrôler l'ouverture et la fermeture de l'eau vers le réseau d'DI pour chaque serre.

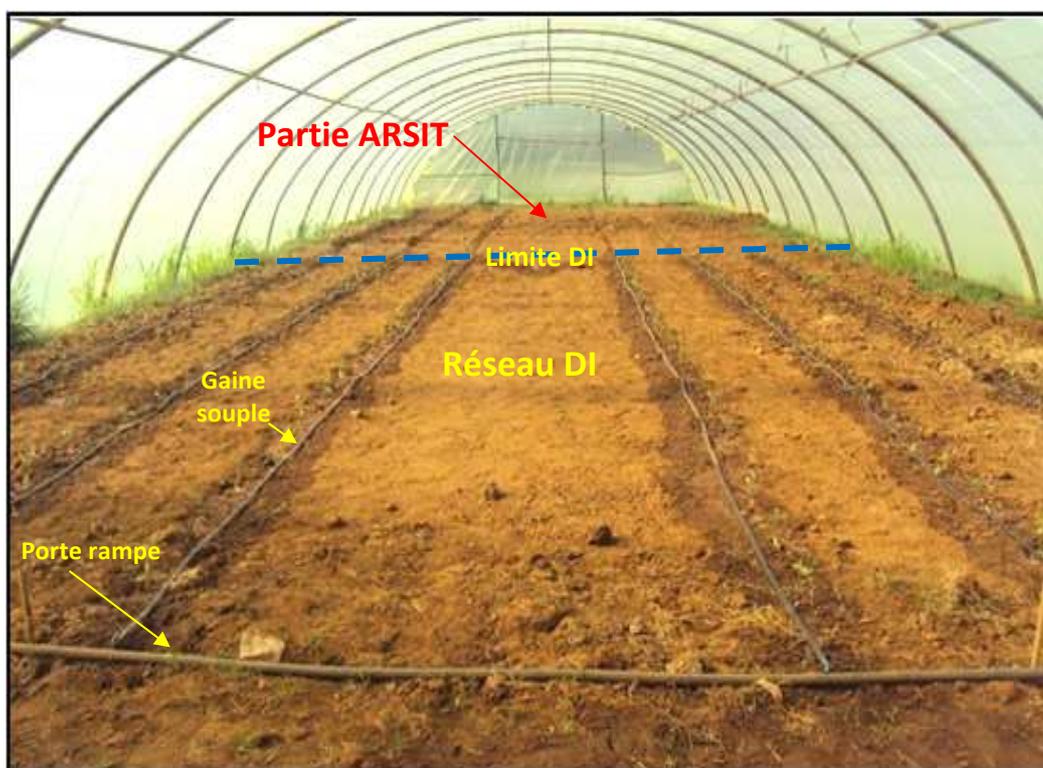


Figure 20 : Aperçu général du réseau DI

3-1-2-Réseau d'irrigation souterraine ARSIT

Le réseau d'irrigation souterraine ARSIT est installé le 04/03/2013 sur la moitié de la superficie totale de chaque serre (120m²). L'installation d'ARSIT est formée de (figures 21 et 22):

- Six conduites ARSIT 6 (lignes : 1, 2, 3, 4, 5, 6,) installées dans chaque serre (12 conduites), d'une longueur de 13 m à une profondeur de 30 cm au-dessous du sol et une distance de 1 m entre chaque conduite ;

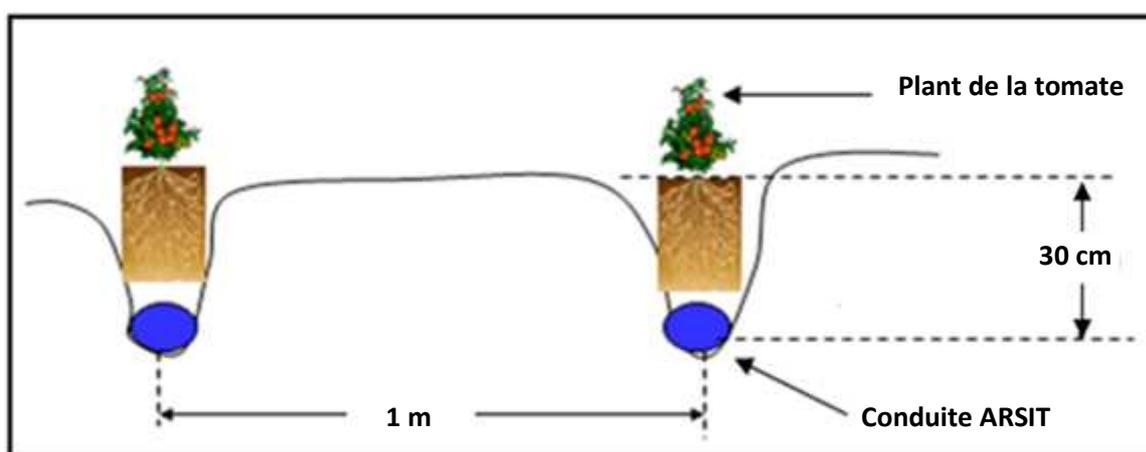


Figure 21 : Vue de face du dispositif ARSIT

- Un réservoir principal d'alimentation d'eau en plastique surélevé de 30 cm d'une capacité de 1000 l, alimente les deux réservoirs secondaires et équipé d'un flotteur pour garder le niveau constant d'eau dans le réservoir ;
- Deux réservoirs d'eau secondaire en plastique semi-enterré pour chaque serre d'une capacité de 200 l et équipés d'un flotteur pour garder le niveau constant d'eau dans chaque réservoir ;
- Deux compteurs volumétriques (débit nominal de 1,5 m³/h ; marque : Zenner) à chaque sortie des deux réservoirs secondaires pour mesurer le volume d'eau consommé pour chaque serre ;
- Trois filtres à l'amont du réservoir principal : filtre à tamis, filtre à laine et filtre à charbon ;
- Deux filtres avant chaque réservoir secondaire : filtre à laine, filtre à charbon ;
- 24 tensiomètres (sonde Watermark) installés dans la serre n°1.

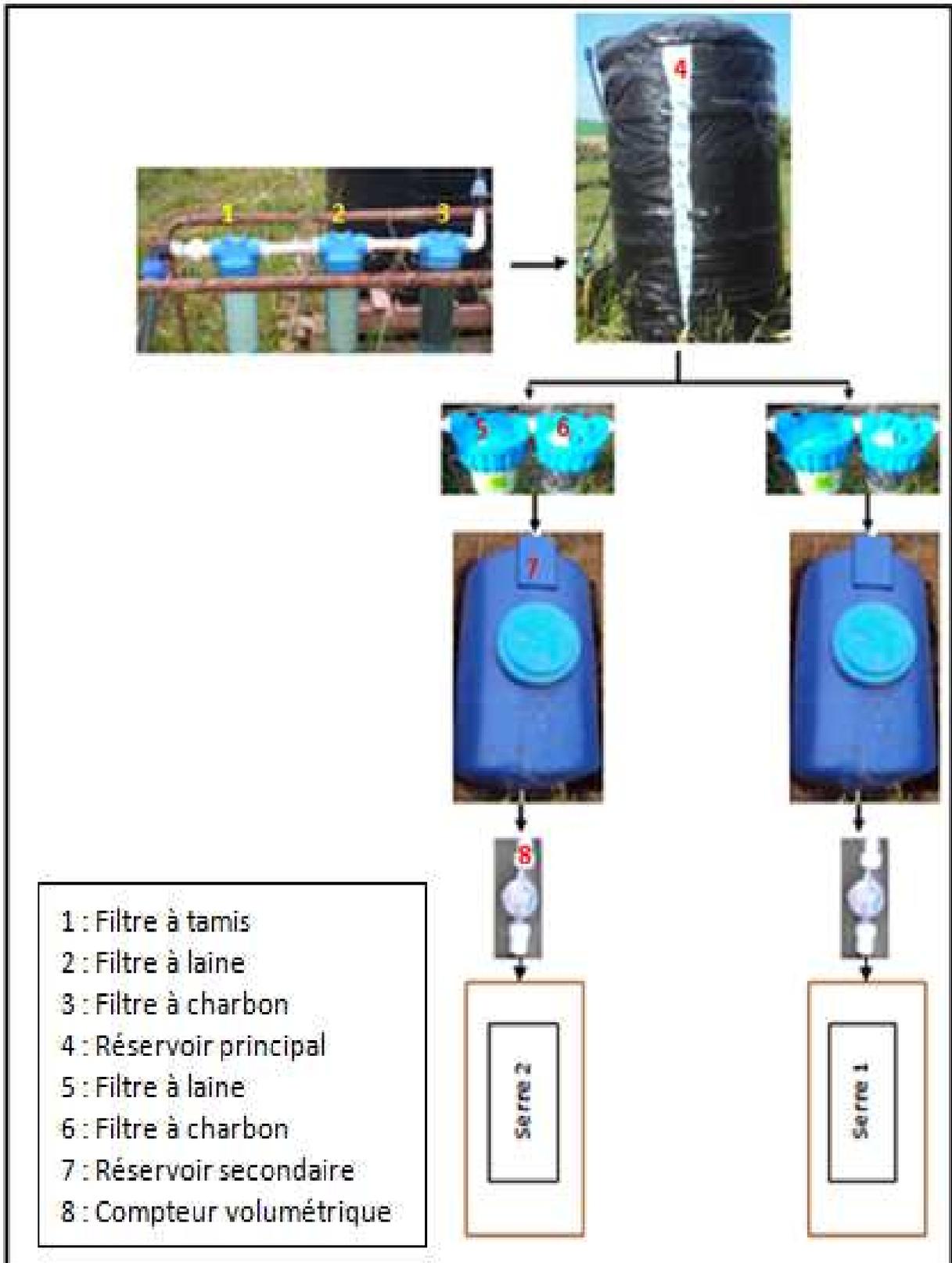


Figure 22 : Equipements de l'installation du réseau d'irrigation ARSIT

3-1-2-1-Conditions d'installation des conduites d'ARSIT sur le terrain

L'installation des conduites d'ARSIT sur le terrain doit respecter les conditions suivantes :

A-Hydrophilisation

L'hydrophilisation c'est une opération qu'on a réalisé avant l'installation des conduites sur le terrain. Elle consiste à maintenir le tuyau en humidité permanente pendant 24 heures dans un mélange d'eau et 0,5% de liquide de vaisselle pour rendre la conduite perméable à l'eau et la nettoyer des impuretés.



Figure 23 : Hydrophilisation des conduites ARSIT

B-Autorégulation

Le fonctionnement de l'autorégulation de la technique ARSIT est assuré quand la pression hydrostatique à l'intérieur des tuyaux est inférieure à 0,1 bar (100 hPa = 100 cm), des pressions de 0,2 à 1 bar causent un débit important délivré et ne vérifient pas l'autorégulation de la technique. Durant notre expérience, l'installation faite sur le terrain pour le réseau d'irrigation de la technique ARSIT a permis de maintenir une charge hydrostatique appliquée sur les conduites inférieure à 0,1 bar. Puisque le réservoir secondaire est équipé d'un flotteur, et d'après la figure 24 la charge hydrostatique appliquée sur les conduites est estimée à 0,07 bar.

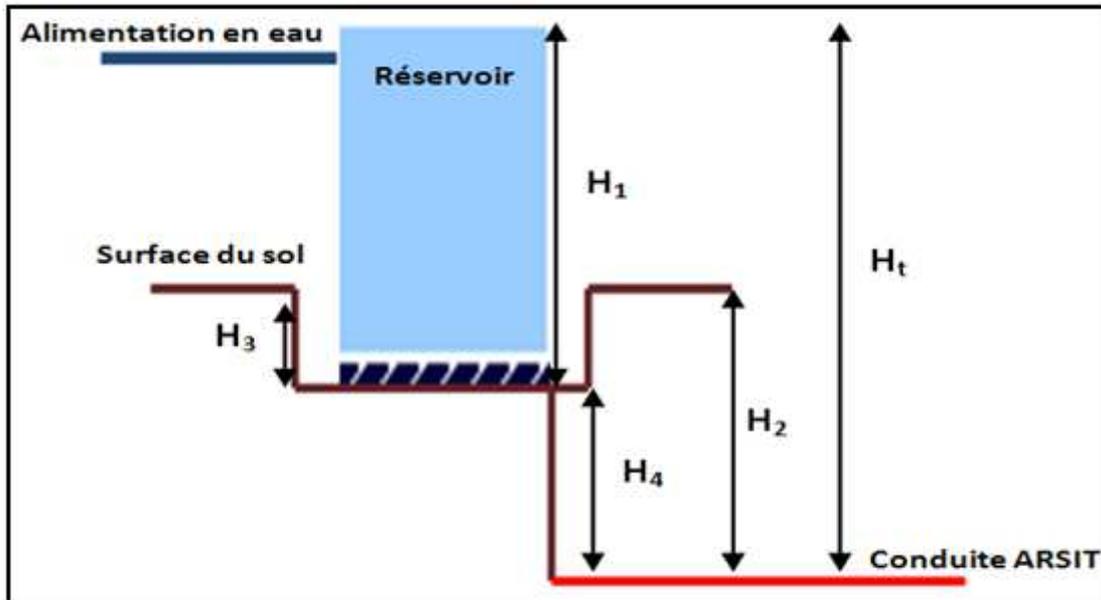


Figure 24 : Schéma de la charge hydrostatique appliquée sur la conduite ARSIT

D'après le schéma la charge hydrostatique appliquée sur les conduites est égale à :

$$H_t = H_1 + H_4 // H_4 = H_2 - H_3 \dots\dots\dots (14)$$

Avec:

H_t : la charge hydrostatique appliquée sur les conduites = 70 cm = 0,70 m = 0,070 bar.

H₁ : la hauteur de l'eau dans le réservoir secondaire = 50 cm = 0,50 m = 0,050 bar

H₂ : la profondeur entre la surface du sol et la conduite = 30 cm = 0,03 bar

H₃ : la profondeur entre la surface du sol et la base du réservoir = 10 cm = 0,01 bar

H₄ : la profondeur entre la base du réservoir et la conduite = 20 cm = 0,02 bar

C- Eau d'irrigation de bonne qualité

Les conduites d'ARSIT sont très sensibles au colmatage. Ce problème a été rencontré dans la première année d'essai sur le système. Selon MEZAOUR (2012) la technique ARSIT n'est pas arrivée à couvrir les besoins de la culture (poivron) et cela est dû au colmatage des micropores des conduites par le dépôt des micro-algues et les sédiments. De ce fait la technique ARSIT nécessite une eau d'irrigation de bonne qualité.

Afin d'éviter le problème de colmatage des conduites d'ARSIT dans notre installation, le réseau d'irrigation a été équipé d'une filtration supplémentaire et un nettoyage continu des filtres. Trois filtres installés à l'amont du réservoir principal et deux filtres installés à l'amont de chaque réservoir secondaire (voir figure 22) ainsi un nettoyage des filtres est réalisé chaque semaine pour assurer une filtration efficace.

D- la pose de la conduite

L'un des problèmes majeur de la technique ARSIT rencontré sur le terrain est la pose des conduites. Avant de placer les conduites sous sol il faut creuser des sillons à la profondeur voulue, dans notre cas les conduites sont installées à une profondeur de 30 cm. Les sillons creusés à l'aide d'une houe ensuite on a recouvert les conduites avec la terre à l'aide d'une pelle.



Figure 25: Pose des conduites ARSIT

Ces opérations sont faites manuellement, absence totale de la mécanisation ce qui a rendu le travail pénible et très long. Il faut chercher des méthodes pour mécaniser la pose des conduites d'ARSIT, comme par exemple la draineuse agricole.

3-2-Matériel végétal

3-2-1-Présentation de la culture

Le type de culture utilisé durant notre expérience est la tomate variété «Doucen ». Cette variété est la plus utilisée en Algérie, elle s'adapte en serre et en plein champs. Les principales caractéristiques de la variété « Doucen » sont :

- Type : Hybride indéterminé utilisé pour le marché frais ;
- Précocité : 85 jours après repiquage ;
- Plante : Plante compacte entre nœud courts ;
- Fruit : fruit d'une couleur rouge vif ;
- Poids moyen du fruit : 250-340 g ;
- Résistance et tolérance : Verticillium, Fusarium, Nématode.



Figure 26 : Plants de la tomate au stade de cinquième feuille

3-2-2-Itinéraire technique

3-2-2-1-Opérations de travail du sol avant la plantation

Le travail du sol est réalisé avant l'installation des deux réseaux d'irrigation (ARSIT, DI) et la plantation de la tomate, pour avoir un sol favorable au développement de la culture, les opérations de travail du sol sont :

Tableau 8 : Opérations de travail du sol avant la plantation

| Date | Opération | Matériel utilisé |
|------------|-------------------|------------------|
| 26/01/2013 | Labour profond | Charrue à soc |
| 29/01/2013 | Labour secondaire | Chisel |
| 30/01/2013 | Discage | Covercrop |

3-2-2-2-Installation de la culture

La plantation de la tomate variété DOUCEN dans les deux serres est effectuée manuellement le 27/02/2013 pour la technique DI et le 06/03/2013 pour la technique ARSIT. L'espacement entre les plants sur la ligne est de 50 cm et entre les lignes est de 1 m, ce qui donne une densité de plantation de 6 plants/m².

Tableau 9 : Nombre de plants par ligne

| Technique DI Date de repiquage : 27/02/2013 | | | Technique ARSIT Date de repiquage : 06/03/2013 | | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|
| Ligne | Nombre des plants (Serre 1) | Nombre des plants (Serre 2) | Ligne | Nombre des plants (Serre 1) | Nombre des plants (Serre 2) |
| 1 | 26 | 26 | 1 | 25 | 25 |
| 2 | 24 | 25 | 2 | 25 | 25 |
| 3 | 25 | 25 | 3 | 25 | 26 |
| 4 | 26 | 26 | 4 | 25 | 26 |
| 5 | 25 | 25 | 5 | 25 | 25 |
| 6 | 23 | 27 | 6 | 25 | 25 |

3-2-2-3-Fertilisations

Une application de fumure de fond a été réalisée manuellement à la volée le 29/01/2013, avant le passage du covercrop pour une meilleure incorporation de fumure. Un autre apport d'engrais solide NPK (15-15-15) a été fait manuellement le 28/03/2013, tout autour du plant de la tomate avec une dose de 3 kg/ serre.

3-2-2-4-Traitements phytosanitaires

Durant le cycle de la tomate on a utilisé des traitements fongicide et insecticide pour bloquer le développement des maladies cryptogamiques et l'attaque des insectes. Le tableau 10 résume les différents traitements phytosanitaires effectués.

Tableau 10 : Traitements phytosanitaires effectués durant le cycle de la tomate

| Date | Nom commercial | Matière active | Effet |
|------------|------------------|----------------------------|---|
| 06/03/2013 | ALPHACIDE 50EC | Alpha-Cypermethirn 5% P/V | Insecticide (contre les fourmis) |
| 04/04/2013 | HUNTER | Amitraz 200 g/l | Acaricide/insecticide |
| | PROPLANT | Propamocarbe Hydrochloride | Fongicide (contre botrytis et alternaria) |
| 10/04/2013 | PROPLANT | Propamocarbe Hydrochloride | Fongicide |
| | HUNTER | Amitraz | Acaricide/insecticide |
| 23/04/2013 | PROPLANT72.2% SL | Propamocarbe Hydrochloride | Fongicide |
| 09/05/2013 | FLASH | Rhodiasane | Fongicide |
| 14/05/2013 | Lamdoc | Lambda cyhalothrin 50 g/l | Insecticide (contre les pucerons) |
| 21/05/2013 | Lamdoc | Lambda cyhalothrin 50 g/l | Insecticide (contre les pucerons) |

Et d'un autre côté la tomate a été aussi attaquée par les virus qui ont provoqué un frisage et un enroulement des feuilles (virus de la mosaïque du tabac (TMV) et virus des feuilles jaunes en cuillère (Tylc)). Comme il n'existe pas un traitement contre les virus on a procédé par l'arrachage des plants infectés pour ne pas contaminer les autres.

3-2-2-5- Désherbage

Un seul désherbage chimique a été effectué le 06/03/2013 au niveau des périmètres intérieurs des deux serres, le produit chimique (Glyphosate) est appliqué mécaniquement à l'aide d'un pulvérisateur. Une série de désherbage manuel a été réalisée pendant le cycle cultural, cette opération se répète à chaque développement des mauvaises herbes. Mais les opérations de désherbage manuel dans la partie irriguée par DI sont très fréquentes par rapport à la partie irriguée par ARSIT.

4- Méthodes

4-1-Méthodologie du travail

Dans notre étude nous avons réalisé une expérience sur la technique d'irrigation souterraine innovante ARSIT (irrigation technology by auto-regulative subsurface pipes) et la technique d'irrigation de surface DI (drip irrigation) pour la conduite de l'irrigation de la tomate dans deux serres (serre n°1 et serre n°2) placées dans l'unité expérimentale n°2 de la station expérimentale de l'ENSA. La culture de la tomate (variété Doucen) est plantée dans les deux serres et dans chaque serre on a installé les deux systèmes d'irrigation le système ARSIT et DI. Pour notre expérience on a choisi un dispositif expérimental en bloc basé sur un facteur étudié avec deux variantes et un gradient d'hétérogénéité. Le facteur étudié est la technique d'irrigation, les deux variantes (traitement) ce sont la technique d'irrigation ARSIT et DI et pour le gradient d'hétérogénéité c'est la pente de terrain. Le nombre de répétition de même traitement est refaite deux fois ainsi on va avoir quatre unités expérimentales. L'intérêt de la répétition est d'avoir une grande précision des résultats et maintenir l'erreur aléatoire liée à l'hétérogénéité du terrain à un niveau aussi faible que possible et aussi pour contrôler les autres facteurs aléatoires tels que l'hétérogénéité liée au travail du sol (réglage des outils, conditions des interventions) et l'hétérogénéité liée aux interventions culturales (applications de produits phytosanitaires, de fertilisants).

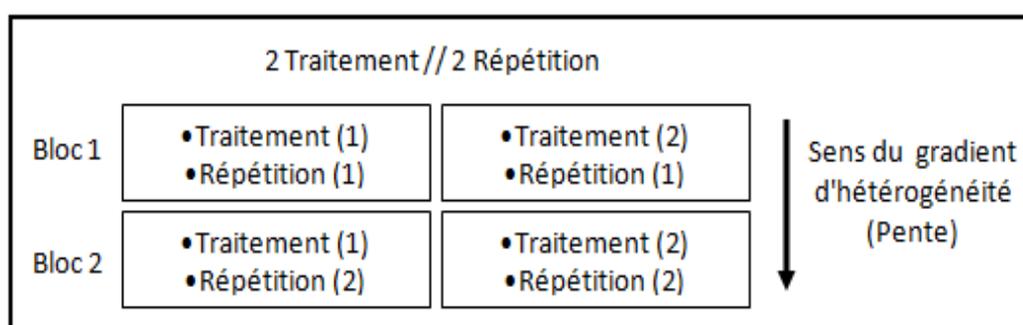


Figure 27 : Dispositif expérimental en Bloc

La technique d'irrigation DI fournit l'eau à la plante en surface par contre la technique d'irrigation ARSIT fournit l'eau à la plante sous la surface à travers des conduites enterrées sous sol et elle libère l'eau en fonction de l'humidité du sol et selon la demande en eau des plantes. L'objectif principal de notre étude est de vérifier les résultats trouvés dans le laboratoire sur la technique innovante ARSIT dans les conditions naturelles c'est-à-dire d'étudier le fonctionnement de la technique d'irrigation ARSIT sur le terrain et d'analyser sa

fiabilité à l'irrigation dans les conditions locales réelles. Pour parvenir à notre objectif on va essayer de répondre aux questions suivantes :

Est ce que le fonctionnement des conduites ARSIT sur le terrain confirme les résultats trouvés dans le laboratoire sur la capacité des conduites à autoréguler l'humidité du sol au voisinage de la capacité au champ ? Si les résultats du laboratoire ne sont pas vérifiés en condition naturelle donc quels sont les obstacles qui limitent le fonctionnement correct de la technique sur terrain ?

Est ce que la productivité de la technique d'irrigation d'ARSIT est plus élevée ou faible par rapport à celle de la technique d'irrigation de DI en matière de consommation de l'eau et du rendement de la culture qui sont pilotées dans les mêmes conditions techniques?

Pour répondre à ces questions nous avons effectué des suivis et des mesures sur le terrain avec les deux techniques d'irrigation (ARSIT et DI) et la culture de la tomate. Les mesures et les suivis réalisés sont :

- Des mesures de la variation dans le temps et l'espace de la teneur en eau du profil du sol de la tomate irriguée par la technique ARSIT (suivi de la teneur en eau).
- Des mesures de la variation dans le temps et l'espace de la charge de pression du profil du sol de la tomate irriguée par la technique ARSIT (suivi tensiométrique).
- Des mesures de l'évolution de la température foliaire et la croissance phénologique de la tomate (hauteur) irriguée par les deux technique ARSIT et DI.
- Des suivis des volumes d'eau délivrés pour l'irrigation de la tomate par les deux techniques ARSIT et DI
- Estimations des rendements de la tomate irriguée par les deux techniques ARSIT et DI.

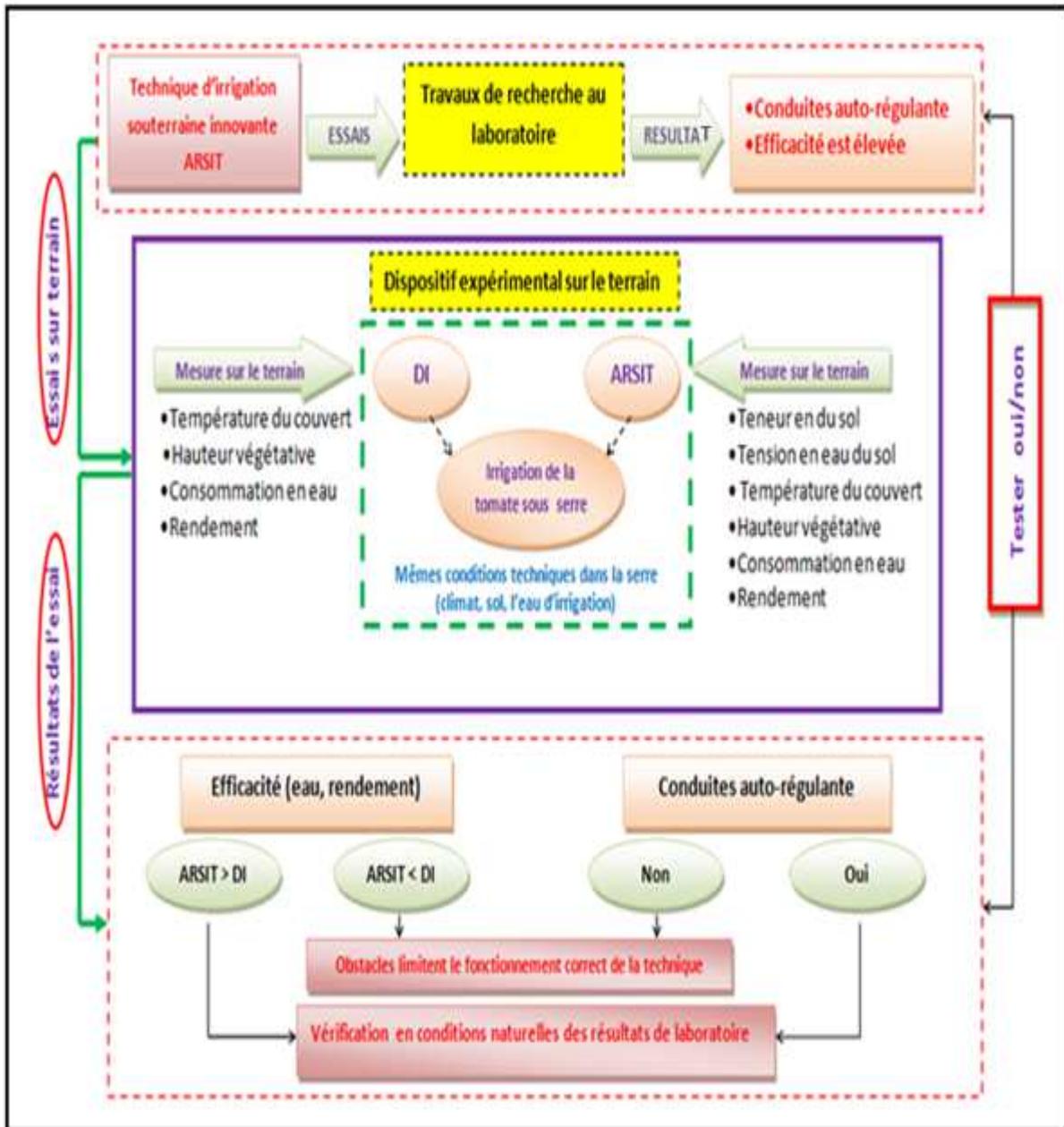


Figure 28 : Diagramme de la démarche de travail adoptée pour la thèse

La collecte de tous les résultats obtenus des différents suivis et mesures effectués sur le terrain vont permettre de comprendre le comportement de la technique ARSIT avec son environnement et l'irrigation de la tomate. Ensuite estimer la réponse de la culture de la tomate à l'irrigation avec la technique ARSIT et essayer d'évaluer ses performances d'irrigation tout en la comparant avec la technique DI.

4-2-Mesures effectuées

Durant notre expérience sur le terrain nous avons effectué des mesures et des suivis de certains paramètres grâce à des appareils de mesures (thermomètre à infrarouge, TDR, hygromètre etc). Le tableau 11 récapitule toutes les mesures réalisées.

Tableau 11 : Appareils de mesures utilisés

| Appareils | Type | Paramètres de mesure | Fréquences de mesure | Emplacement | | Nombre |
|--------------------------|-------------------|--|------------------------|-------------|------------------------|--------|
| | | | | Serre | Technique d'irrigation | |
| Bac | classe A | •L'évaporation | Journalière | 1 | ARSIT/DI | 1 |
| Hygromètre | LOG32 | •Température •Humidité •Température au point de rosé | Journalière | 1 | ARSIT/DI | 1 |
| Thermomètre à infrarouge | IR tec P800 | •Température foliaire | Journalière | 1 et 2 | ARSIT/DI | 1 |
| Ruban gradué | | •Hauteur de la plante | Chaque stade végétatif | 1 et 2 | ARSIT/DI | 1 |
| TDR | TDR100 | •Humidité du sol | Chaque 10 jour | 1 | ARSIT | 1 |
| Tensiomètre | Monitor Watermark | •Tension de l'eau dans le sol | Chaque 6 heures | 1 | ARSIT | 24 |
| Compteur volumétrique | Zenner | •Consommation en eau | Journalière | 1 et 2 | ARSIT | 2 |

4-2-1-Mesure de la température et l'humidité de l'air sous serre

Les mesures journalières de l'humidité et la température dans la serre sont enregistrées par l'Hygromètre installé d'une façon permanente dans la serre n°1 (voir figure 29), il permet de mesurer la température (°C), l'humidité (%), et la température au point de rosé (°C).



Figure 29 : Hygromètre installé dans la serre n°1

4-2-2-Mesures agronomiques

4-2-2-1-Suivi des stades phénologiques

Le suivi des stades phénologiques de la tomate irriguée par DI et ARSIT nous a permis de la caractériser depuis la plantation jusqu'à la maturation, le suivi est résumé dans le tableau 12.

Tableau 12 : Date d'apparition des stades phénologiques de la tomate irriguée avec DI et ARSIT

| DI | | | ARSIT | | |
|------------|------|----------------|------------|------|----------------|
| Date | JAP* | stade | Date | JAP* | stade |
| 27/02/2013 | 0 | Plantation | 06/03/2013 | 0 | Plantation |
| 27/03/2013 | 28 | Floraison | 02/04/2013 | 27 | Floraison |
| 01/04/2013 | 33 | nouaison | 12/04/2013 | 37 | nouaison |
| 06/04/2013 | 38 | Fructification | 20/04/2013 | 45 | Fructification |
| 21/05/2013 | 83 | Récolte1 | 30/05/2013 | 85 | Récolte1 |
| 23/05/2013 | 85 | Récolte 2 | 05/06/2013 | 91 | Récolte 2 |
| 30/05/2013 | 92 | Récolte 3 | 10/06/2013 | 96 | Récolte 3 |
| 04/06/2013 | 97 | Récolte 4 | 18/06/2013 | 104 | Récolte 4 |
| 09/06/2013 | 102 | Récolte 5 | 24/06/2013 | 110 | Récolte 5 |
| 11/06/2013 | 104 | Récolte 6 | 02/07/2013 | 118 | Récolte 6 |
| 16/06/2013 | 109 | Récolte 7 | | | |
| 24/06/2013 | 117 | Récolte 8 | | | |
| 02/07/2013 | 125 | Récolte 9 | | | |

* : jours après plantation

4-2-2-2-Température de la surface du couvert végétal

La température de la surface du couvert végétale est mesurée pratiquement chaque jour à midi (midi solaire) à l'aide d'un thermomètre infrarouge (voir figure 30). Le nombre des mesures de la température dans chaque serre est de 16 mesures. 8 pour la tomate irriguée par ARSIT et 8 pour la tomate irriguée par DI. Ensuite la température moyenne des plants de la tomate est calculée pour chaque technique d'irrigation. On convertit les températures mesurées par le thermomètre du degré kelvin au degré Celsius par la soustraction de 275 de la valeur mesurée.

$$T_c = T_K - 275 \dots \dots \dots (15)$$

Avec :

T_K : la température en kelvins.

T_c : la température en degrés Celsius.



Figure 30: Mesure de la température du couvert végétale avec un thermomètre à infrarouge

4-2-2-3-Hauteur végétative

La structure phénologique de la tomate est estimée par sa hauteur à chaque stade végétatif à l'aide d'un ruban gradué pour la hauteur (voir figure 31). La mesure de la hauteur est faite quatre fois (dans chaque stade végétatif) pour la tomate irriguée avec les deux techniques (ARSIT et DI) et dans les deux serres (serre n°1, serre n°2).

Tableau 13: Dates de mesure de la hauteur végétative

| Date | Stade |
|------------|----------------|
| 28/03/2013 | Développement |
| 31/03/2013 | Floraison |
| 22/04/2013 | Fructification |
| 22/05/2013 | Maturation |
| 07/02/2013 | Fin maturation |

Le nombre de plants mesurés dans chaque serre est de 16 plants. 8 pour la tomate irriguée par ARSIT et 8 pour la tomate irriguée par DI, en suite la hauteur moyenne des plants de la tomate est calculée pour chaque technique d’irrigation.



Figure 31 : Mesure de la hauteur végétative avec un ruban gradué

4-2-2-4-Rendement

Les fruits de la tomate sont récoltés en pleine maturation et pesés à l’aide d’une balance afin de calculer la production en poids frais de la tomate des douze cueillettes effectuées (voir tableau 14). Ensuite on a estimé le rendement total par chaque système d’irrigation selon la formule suivante :

$$R_{dt} \text{ (t/ha)} = \frac{\text{Production totale (t)}}{\text{Surface (ha)}} \dots\dots\dots (16)$$

Tableau 14 : Dates des cueillettes de la tomate dans les deux serres

| Cueillette | Date | Technique ARSIT | | Technique DI | |
|------------------|------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | Serre 1 | Serre 2 | Serre 1 | Serre 2 |
| 1er cueillette | 21/05/2013 | Pas de récolte | Récolte | Récolte | Récolte |
| 2eme cueillette | 23/05/2013 | Pas de récolte | Pas de récolte | Récolte | Récolte |
| 3eme cueillette | 30/05/2013 | Récolte | Récolte | Récolte | Récolte |
| 4eme cueillette | 04/06/2013 | Pas de récolte | Pas de récolte | Récolte | Récolte |
| 5eme cueillette | 05/06/2013 | Récolte | Récolte | Pas de récolte | Pas de récolte |
| 6eme cueillette | 09/06/2013 | Pas de récolte | Pas de récolte | Récolte | Récolte |
| 7eme cueillette | 10/06/2013 | Récolte | Récolte | Pas de récolte | Pas de récolte |
| 8eme cueillette | 11/06/2013 | Pas de récolte | Pas de récolte | Pas de récolte | Récolte |
| 9eme cueillette | 16/06/2013 | Pas de récolte | Pas de récolte | Récolte | Récolte |
| 10eme cueillette | 18/06/2013 | Récolte | Récolte | Pas de récolte | Pas de récolte |
| 11eme cueillette | 24/06/2013 | Récolte | Récolte | Récolte | Récolte |
| 12eme cueillette | 02/07/2013 | Récolte | Récolte | Récolte | Récolte |

4-2-3-Mesure de l'humidité du sol pour la tomate irriguée avec ARSIT

4-2-3-1-Mesure de la teneur en eau du sol

Un suivi de la teneur en eau du sol est effectué dans la serre n°1. Les prélèvements des échantillons du sol prélevés par la tarière sont faits sur des profondeurs de 10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm, répartis d'une façon radiale par rapport au plant de la culture 0 cm, 20 cm, 40 cm, -20 cm, -40 cm et répétés sur deux endroits de l'installation d'ARSIT (voir figure 32 et 33).

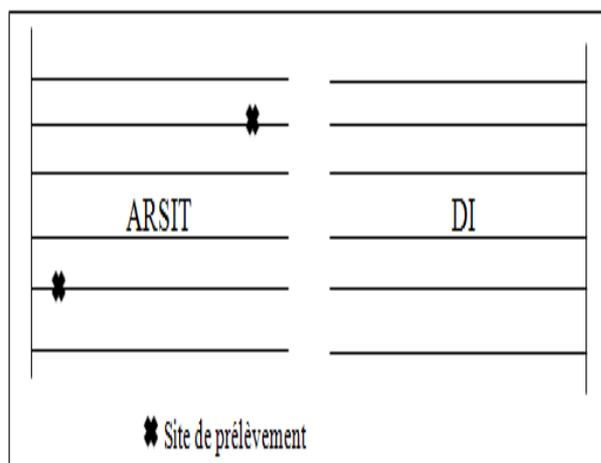


Figure 32: Vue en plan des positions des prélèvements

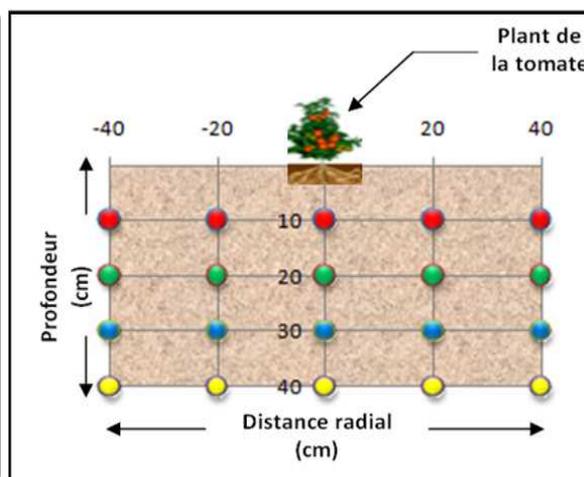


Figure 33 : Points de mesures de la teneur en eau

Ainsi un nombre de 40 points de mesures pour chaque date de prélèvement avec huit dates de prélèvements d'une fréquence de dix jours (voir tableau 15).

Tableau 15: Dates de prélèvements des échantillons pour la détermination de l'humidité du sol

| Jours après plantation | Date de prélèvement |
|------------------------|---------------------|
| 33 | 08/04/2013 |
| 42 | 17/04/2013 |
| 53 | 28/04/2013 |
| 63 | 08/05/2013 |
| 84 | 29/05/2013 |
| 95 | 09/06/2013 |
| 105 | 19/06/2013 |
| 116 | 30/06/2013 |

La mesure de la teneur en eau pour les profondeurs 30 et 40 cm sont faites à l'aide de la méthode directe à double pesée (granulométrique). Cette méthode consiste à prélever des échantillons du sol aux points de mesure définis à l'aide d'une tarière, ensuite une pesée de ces échantillons avant et après leurs passages à l'étuve réglée à 105°C durant 24 heures qui permet de déterminer l'humidité pondérale. A partir de l'humidité pondérale trouvée et la densité apparente connue nous déterminons l'humidité volumique.

$$\theta_p = \frac{w_h - w_s}{w_h} \dots\dots\dots (17)$$

$$\theta_v = \theta_p \times D_a \dots\dots\dots (18)$$

Avec:

θ_p : Teneur en eau pondérale (%)

θ_v : Teneur en eau volumique (%)

w_s : Poids du sol après passage à l'étuve (g)

w_h : Poids du sol avant passage à l'étuve (g)

D_a : Densité apparent (g/cm³)

La mesure de la teneur en eau pour les profondeurs 10 et 20 cm est faite à l'aide de la méthode indirecte de la TDR (voir figure 34).



Figure 34 : Mesure de la teneur avec TDR

Mais avant de commencer les mesures il faut étalonner le TDR en procédant comme suit :

1-Mesurer la teneur en eau avec la TDR sur le point de mesure défini ;

2-Prélever l'échantillon de sol à l'aide d'une tarière de point de mesure défini ;

3-Déterminer l'humidité pondérale de l'échantillon de sol en suivant les mêmes étapes de la méthode granulométrique ;

4-Répéter les trois étapes précédentes pour chaque point de mesure en profondeur et latéralement ;

5-Tracer la courbe des valeurs d'humidités pondérales en fonction de celles mesurées par TDR, et ensuite déduire l'équation d'étalonnage de la TDR pour chaque profondeur;

- Profondeur 10 cm : $Y = 0,956 X - 2,923 // R^2 = 0,96$

- Profondeur 20 cm : $Y = 0,726 X - 3,312 // R^2 = 0,913$

6-Étalonner les valeurs mesurées par la TDR à l'aide de l'équation d'étalonnage pour chaque profondeur ;

7-Déterminer l'humidité volumique en multipliant la densité apparente par la valeur étalonnée.

8-Répéter les deux étapes précédentes pour chaque valeur d'humidité du sol mesurée avec TDR.

4-2-3-2-Estimations du stock d'eau

Les mesures de la teneur en eau du sol ont permis de calculer les stocks en eau du sol pour les huit dates de prélèvements dans la zone racinaire en utilisant la relation suivante :

$$S = \int_0^{z_i} \theta_{vi} \times Z_i \dots\dots\dots (19)$$

S: Stock d'eau (mm)

Z_i: Profondeur du sol considérée (cm)

θ_{vi}: Humidité volumique à la profondeur Z_i (%)

4-2-3-3-Estimations de la réserve utile du sol

La réserve utile (RU) correspond à la fraction de la réserve qui est exploitable par la plante, c'est-à-dire la fraction accessible par les racines et absorbable par leur succion.

-Réserve à la capacité au champ :

$$R_{cc} = H_{cc} \times Z_r \times D_a \times 10 \dots\dots\dots (20)$$

-Réserve au point de flétrissement :

$$R_{pf} = H_{pf} \times Z_r \times D_a \times 10 \dots\dots\dots (21)$$

-Réserve utile du sol :

$$RU = R_{cc} - R_{pf} \dots\dots\dots (22)$$

Avec :

- RU : Réserve Utile (mm)
- H_{cc} : Humidité pondérale à capacité au champ
- H_{pf} : Humidité pondérale à capacité au point de flétrissement
- D_a : Densité apparente du sol (g/cm³)
- Z_r : Profondeur des racines (mm)

Les valeurs de la profondeur racinaire qui ont été prises pour le calcul de la réserve utile d'eau pour chaque date de prélèvement sont estimées à partir des mesures effectuées sur les racines au cours du cycle de développement de la tomate irriguée par ARSIT. Une première mesure effectuée lors de la plantation des plants de la tomate (0 JAP), une

deuxième mesure effectuée dans le stade de nouaison (42 JAP) et une troisième mesure effectuée dans le stade de maturation (120 JAP). Et pour les valeurs des profondeurs racinaires des autres dates de prélèvement ont été estimées à partir des valeurs des profondeurs racinaires mesurées sur terrain.

En supposant que le développement des racines suit une fonction croissante et linéaire, et en basant sur les trois mesures des racines réalisées sur terrain, on a pu tracer deux droites la première entre 0 JAP à 42 JAP et la deuxième droite entre 42 JAP à 116 JAP. A partir de ces deux droites on a estimé la profondeur racinaire pour chaque date de prélèvement.

- Droite entre 0JAP à 42 JAP: $Y = 0,357 X + 5$
- Droite entre 42 JAP à 116 JAP: $Y = 0,202 X + 11,48$

Tableau 16 : Origine de la valeur de la profondeur racinaire pour chaque date de développement

| Date de prélèvement JAP | Stades | Origine de la valeur de la profondeur racinaire |
|-------------------------|----------------|---|
| 0 | Plantation | Mesurée |
| 33 | Floraison | Estimée |
| 42 | Nouaison | Mesurée |
| 53 | Fructification | Estimée |
| 63 | Fructification | Estimée |
| 84 | Fructification | Estimée |
| 95 | Maturation | Estimée |
| 105 | Maturation | Estimée |
| 116 | Maturation | Mesurée |

4-2-3-4- Configuration de la distribution de la teneur en eau dans le sol

Les mesures de la teneur en eau du sol à différentes profondeurs ont permis de tracer des courbes d'iso-valeurs d'humidité et interpoler les valeurs intermédiaires à l'aide de la méthode d'interpolation triangulation avec lissage (Triangulation With Smoothing) intégrée dans le logiciel MapInfo. La distribution transversale de la teneur en eau dans le sol autour de la conduite ARSIT est faite pour les sept dernières dates de prélèvement (voir tableau 17).

4-2-4-Suivi de la tension en eau du sol de la tomate irriguée avec ARSIT

Les mesures de la tension de l'eau dans le sol sont effectuées dans la serre n°1 grâce à 24 tensiomètres montés sur tube PVC en quatre lieux de mesures localisés à un tiers et deux

tiers de la conduite du milieu des deux blocs. Chaque six tensiomètres sont connectés au Monitor Watermark (voir figure 35).



Figure 35 : Emplacement des tensiomètres

Les 24 tensiomètres installés à des profondeurs de 20 cm, 30 cm, 40 cm disposés à deux séries, la première à 10 cm de la conduite et la deuxième à une distance de 20 cm de la conduite (voir figure 36). Le Monitor Watermark a été programmé pour enregistrer chaque six heures la tension en eau du sol mesurée par les tensiomètres.

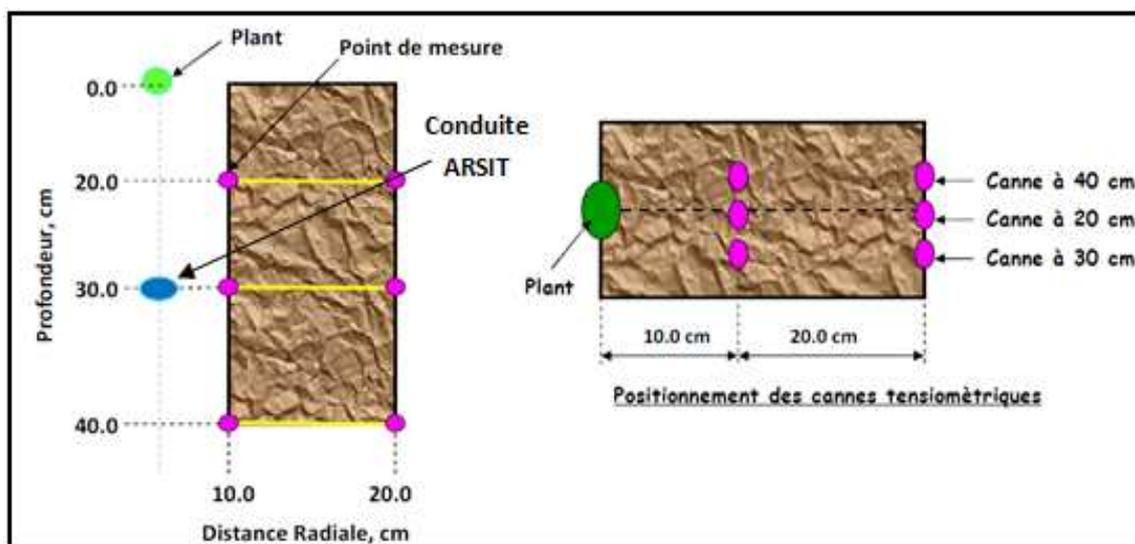


Figure 36: Position des tensiomètres

L'enregistrement journalier de la tension de l'eau dans le sol a permis d'évaluer la disponibilité de l'eau à la plante durant son cycle de croissance et d'estimer la direction de l'écoulement à partir de signe de gradient de charge hydraulique.

$$\frac{dH}{dZ} = \frac{dh - dz}{dz} \dots\dots\dots (23)$$

Si $\frac{dH}{dZ} < 0$ Flux descendant

Si $\frac{dH}{dZ} > 0$ Flux ascendant

Si $\frac{dH}{dZ} = 0$ Flux nul

Avec :

H : la charge hydraulique (cm)

h : la charge matricielle ou suction (cm)

Z : la profondeur verticale orientée positive vers le bas (cm)

4-2-5-Mesure du volume d'eau d'irrigation consommé

4-2-5-1-Volume d'eau d'irrigation délivré par ARSIT

Le volume d'eau d'irrigation délivré par les conduites ARSIT est mesuré par deux compteurs volumétriques similaires installés à la sortie de chaque réservoir secondaire de chaque serre.

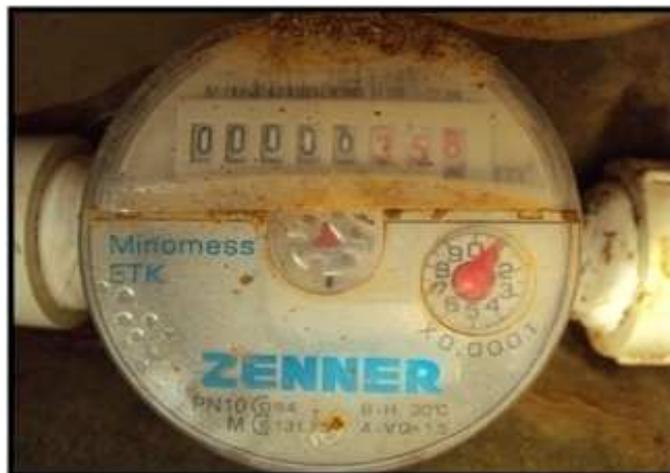


Figure 37 : Compteur volumétrique ZENNER

Le compteur enregistre chaque fois qu'il y a un passage de l'eau à travers le compteur, ce dernier va marquer dans le code barre à huit rouleaux le volume consommé cumulé en m³ et avec une résolution de 10⁻⁴. Les valeurs sont notées chaque jour à la même heure pour

déterminer le volume d'eau d'irrigation journalière consommé et la somme de ces volumes journaliers donne le volume d'eau total d'irrigation délivré par la technique ARSIT.

$$\text{Volume d'eau total d'irrigation consommé (m}^3\text{)} = \sum \text{Volume d'eau d'irrigation journalier}_{(\text{jour } x)} = \sum (\text{volume d'eau d'irrigation}_{(\text{jour } x)} - \text{volume d'eau d'irrigation}_{(\text{jour } x-1)}) \dots\dots\dots (24)$$

À partir des volumes d'eaux journalières délivrées par les conduites ARSIT on a calculé la dose d'irrigation journalière.

$$\text{Dose d'irrigation journalière (mm/jour)} = \text{Volume d'eau d'irrigation journalière (L/jour)} / \text{Surface irriguée (m}^2\text{)} \dots\dots\dots (25)$$

4-2-5-2- Volume d'eau d'irrigation délivré par DI

Durant le cycle cultural de la tomate les doses d'irrigation ont été prises égales aux évapotranspirations maximales (ETM) qui sont calculées par la relation entre les évapotranspirations (ETP) sous serre et le coefficient cultural (1,15).

$$\text{ETM} = \text{ET} \cdot K_c \dots\dots\dots (26)$$

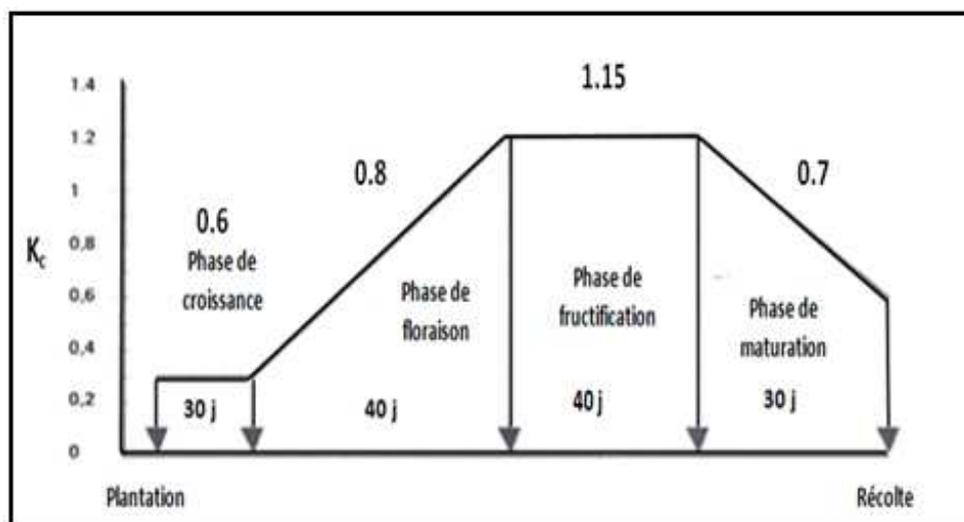


Figure 38 : Valeurs de coefficients culturaux en fonction des phases de croissance de la culture de tomate sous serre. Source : Doorenbos et Pruitt, 1975

L'évapotranspiration (ETP) sous serre est estimée par la formule (26), à partir d'un suivi journalier de l'évaporation de la nappe d'eau libre du bac classe A installé dans la serre n°1 durant tout le cycle végétatif de la tomate. La mesure de la baisse du niveau de l'eau libre

dans le bac est faite à l'aide de la jauge à crochet, cette dernière permet de mesurer les variations de la hauteur d'eau en mm et avec une résolution de 0,05 mm.

$$ETP = E_B \times K_B \dots\dots\dots (27)$$

Où :

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

K_B : Coefficient Bac (0,7) (FAO, 1975)

E_B : Evaporation Bac (mm)



Figure 39 : Mesure de l'eau évaporée dans le bac à l'aide de la jauge à crochet

La dose d'irrigation est apportée quand le cumul de l'ETM est égal à 20 mm. Le volume d'eau total d'irrigation apporté par la technique DI est déterminé par la multiplication de la somme des doses d'irrigation fois la surface irriguée (120m²).

$$\text{Volume d'eau total d'irrigation consommé (L)} = \sum \text{Dose d'irrigation (mm)} \times \text{Surface irriguée (m}^2\text{)} \dots\dots\dots (28)$$

4-2-6-Mesure des efficacités d'irrigation

L'appréciation de l'efficacité d'irrigations des deux techniques ARSIT est DI est déterminée par le calcul de deux efficacités, l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) et l'efficacité agronomique (EA).

- Efficience de l'utilisation de l'eau WUE :

$$WUE = \frac{\text{Rendement (kg/ha)}}{\text{Volume consommé (m3/ha)}} \dots\dots\dots (29)$$

- Efficience agronomique EA :

$$EA = \frac{\text{Volume consommé (m3/ha)}}{\text{Rendement (kg/ha)}} \dots\dots\dots (30)$$

Ces deux efficaciences sont calculées pour une surface irriguée de 120 m² (la moitié de la surface de la serre), un rendement moyen et une consommation en eau moyenne pour les deux serres par chaque technique d'irrigation.

4-3-Conclusion

Dans cette partie on a présenté la zone d'étude, le dispositif expérimental installé sur le terrain et le protocole expérimental adopté. Pour le choix de notre dispositif expérimental on n'a pas pris la qualité de l'eau comme un facteur étudié, malgré qu'on ait utilisé de l'eau filtrée pour la technique ARSIT et de l'eau non filtrée pour la technique DI. On s'est basé seulement sur un facteur étudié qui est la technique d'irrigation avec deux variantes (ARSIT et DI). La technique d'irrigation de goutte à goutte a été choisie comme une technique de comparaison par rapport à la technique ARSIT, pour son mode d'irrigation de surface et son efficience élevée par rapport aux techniques d'irrigation de surface existantes. Mais on remarque l'absence de plusieurs éléments dans le réseau d'irrigation de goutte à goutte (DI) tels que :

- La pompe pour assurer la pression nécessaire au fonctionnement du réseau
- Le filtre à sable et à tamis pour le filtrage de l'eau d'irrigation
- L'injecteur d'engrais pour la fertigation
- Le régulateur de pression pour maintenir la plage de fonctionnement de réseau
- Le manomètre pour indiquer la pression dans le réseau

Et pour le réseau d'irrigation d'ARSIT on a observé que les deux compteurs volumétriques n'arrivent pas à mesurer le passage des faibles volumes d'eau vers le réseau, ainsi va influencer sur le résultat du volume totale apporté par ARSIT. Il faut remplacer ces compteurs par d'autres qui sont plus sensible aux faibles pressions tels que les compteurs électroniques.

Durant notre expérience on a rencontré plusieurs problèmes qui ont influencé sur l'application correcte de notre protocole expérimental, parmi ces problèmes en citant :

- L'arrêt du compteur volumétrique de la serre n°2 à l'enregistrement des volumes consommés. De ce fait on a prit seulement les valeurs enregistrées par le compteur de la serre n°1 pour le calcul du volume consommé et l'efficience d'irrigation de la technique ARSIT.

- Les coupures d'eau qui ont influencé le suivi de l'humidité du sol de la tomate irriguée avec ARSIT.

- L'attaque de virus sur les plants de la tomate ce qui a influencé l'estimation du rendement.

- La non poursuite des cueillettes jusqu'à la fin de cycle de la tomate.

Partie III

Résultats et discussions

1- Aperçu climatique sous serre et en plein champ durant la période d'essai

Les caractéristiques climatiques sous serre sont estimées durant toute la période de l'essai (du 27 février au 02 juillet) à l'aide d'un hygromètre et un Bac classe A placés dans la serre n°1. On a commencé les mesures et les enregistrements de ces paramètres le 27 mars jusqu'au 30 juin et on a observé un arrêt de l'enregistrement de la température et de l'humidité de l'air durant une semaine (du 29/04/2013 au 05/05/2013) dû à une panne de l'hygromètre. Dans les paragraphes qui suivent on va présenter l'évolution des paramètres climatiques sous serre et en plein champ. Pour les paramètres climatiques en plein champ on a pris les données de l'ENSA enregistrées pendant la même période de l'expérience (voir annexe D et E).

1-1-Température de l'air

La figure ci-dessous représente l'évolution des températures journalières de l'air sous serre (minimales, maximale et moyennes) et la température moyenne de l'air en plein champs.

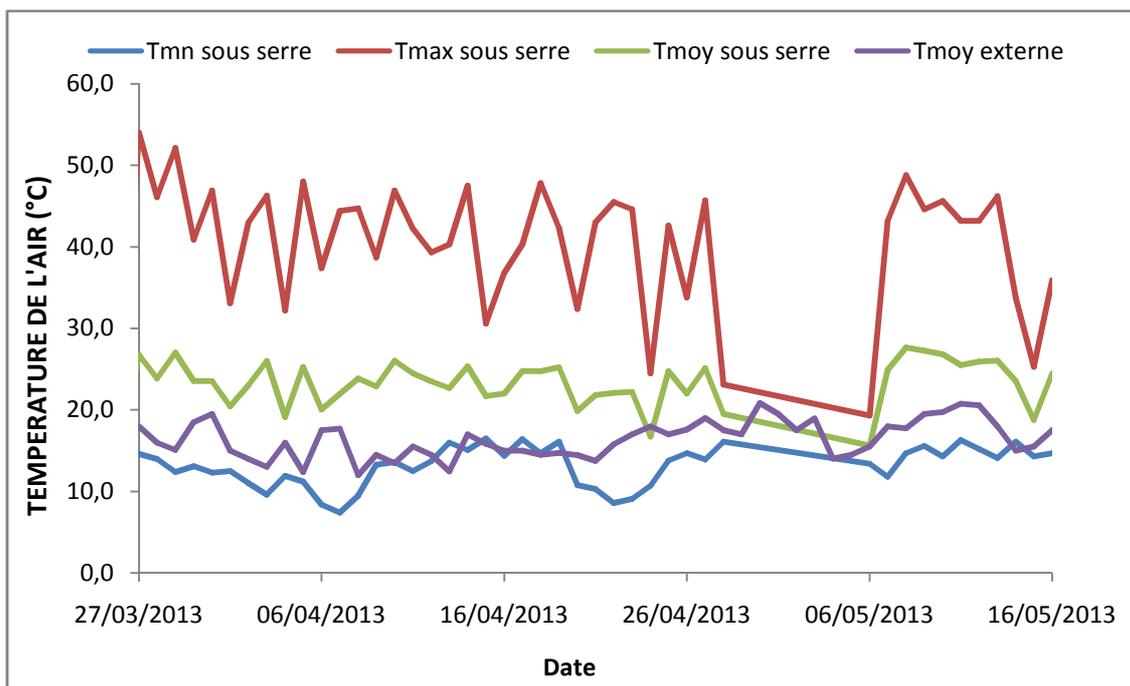


Figure 40 : Evolution journalière de la température sous serre et plein champ

Le graphe montre que les valeurs de la température sous serre ont une tendance d'augmenter avec des amplitudes différentes allant de 19,3°C à 54°C pour les températures maximales et de 7,4°C à 16,5°C pour les températures minimales, ainsi des températures

moyennes varient entre 27,7°C et 15,16°C. Et pour les températures moyennes en plein champ on remarque qu'elles sont inférieures aux températures moyennes sous serre, avec une température maximale et minimale qui sont respectivement 26°C et 12°C.

1-2-Humidité de l'air

La figure ci-dessous représente l'évolution de l'humidité relative moyenne de l'air sous serre et en plein champ.

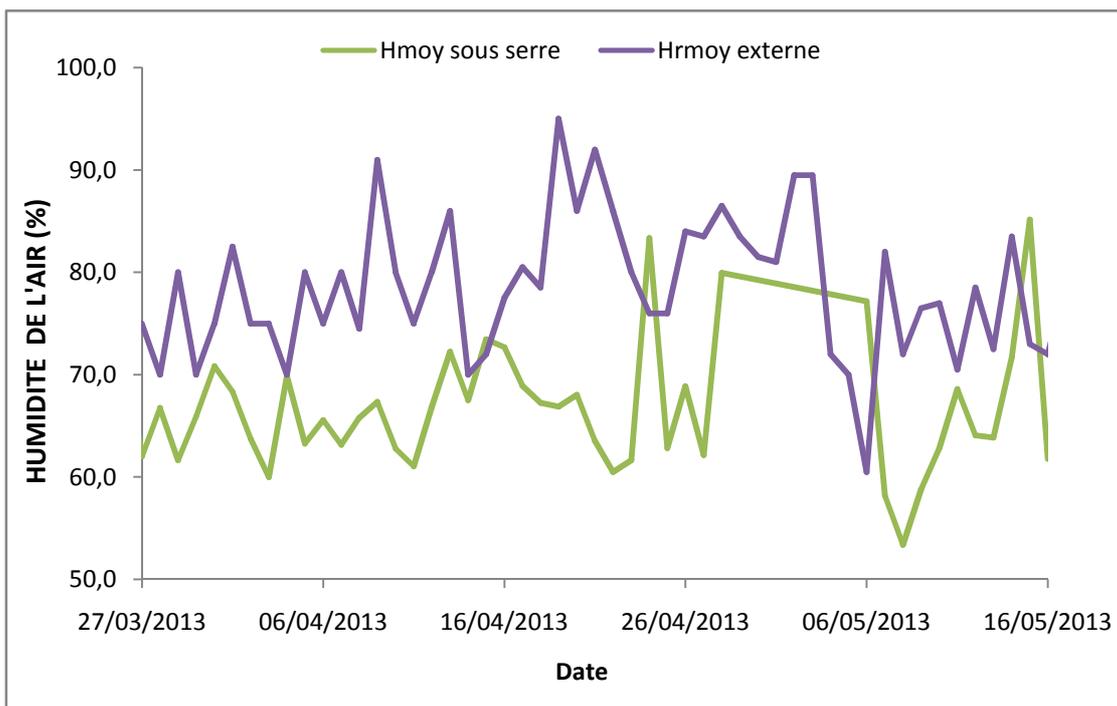


Figure 41 : Evolution journalière de l'humidité relative moyenne de l'air sous serre et plein champ

Les valeurs des humidités montrent que l'air est presque saturé d'humidité, un maximum de 85,2% et un minimum de 53,4%. Ces taux d'humidités sont favorables à la croissance de la culture de tomate sous serre. Et pour les humidités relatives en plein champs sont supérieure aux humidités sous serre, avec une humidité maximale et minimale qui sont respectivement 95 % et 57,5 %.

1-3-Évapotranspiration de référence

La figure ci-dessous représente l'évolution journalière de l'évapotranspiration sous serre enregistrées et en plein champ.

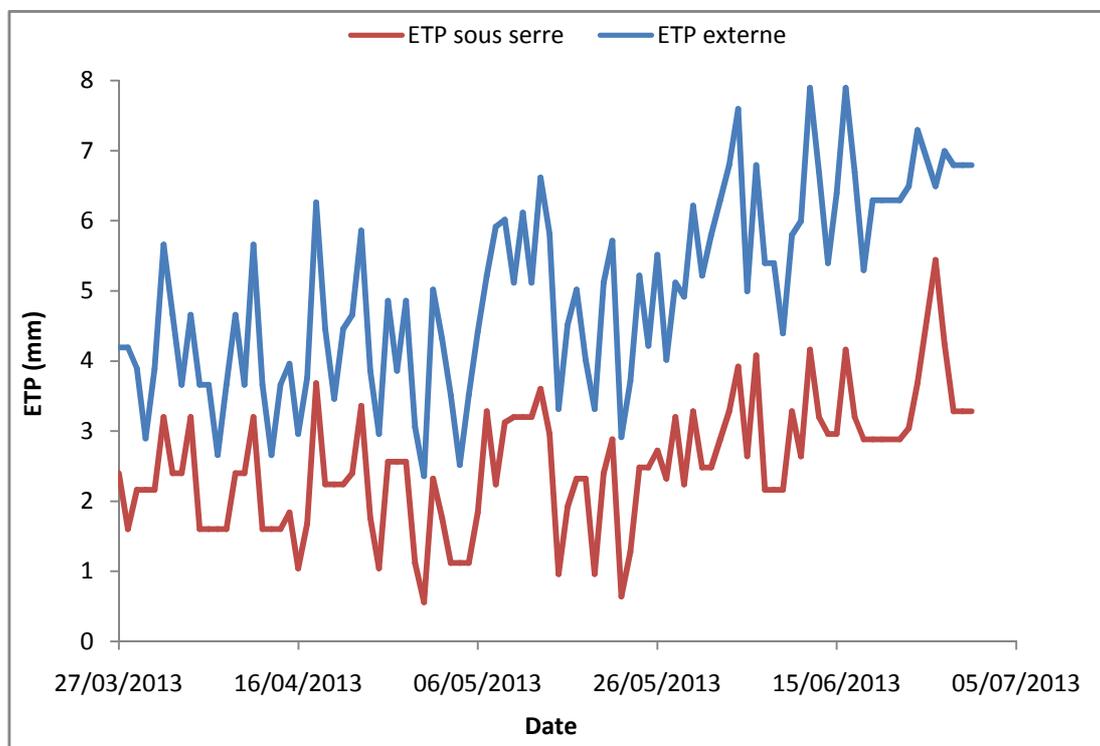


Figure 42 : Evolution journalière de l'évapotranspiration sous serre et en plein champ

Le graphe montre que l'évapotranspiration sous serre a une tendance d'augmenter avec un maximum de 5,44 mm et un minimum de 0,56 mm ainsi une évapotranspiration sous serre moyenne de l'ordre de 2,48 mm. Les valeurs de l'évapotranspiration externe supérieures aux valeurs de l'évapotranspiration sous serre, avec un maximum de 7,89 mm et un minimum de 2,35 mm ainsi une évaporation moyenne d'environ 4,95 mm.

D'après les données des paramètres climatiques sous serre et en plein champ, on a remarqué que les températures dans un milieu fermé sont plus élevées de 7°C en moyenne par rapport aux températures en plein champ. De plus dans un milieu fermé la pression de vapeur saturante augmente avec la température, ainsi on a trouvé que l'humidité relative sous serre est plus faible de 9% en moyenne par rapport à l'humidité en plein champ. En conséquence l'air chaud dans la serre contient plus d'eau que l'air froid à l'extérieur, ce qui influe sur le taux d'évapotranspiration, dont on a trouvé que les évapotranspirations enregistrées sous serre sont plus faibles par rapport à celles en plein champs.

2-Comparaison des efficacités techniques et agronomiques entre ARSIT et DI

2-1-Comparaison des hauteurs végétales

La figure ci-dessous montre le développement de la hauteur de la tige de la tomate irriguée avec le DI et ARSIT pour chaque stade végétatif.

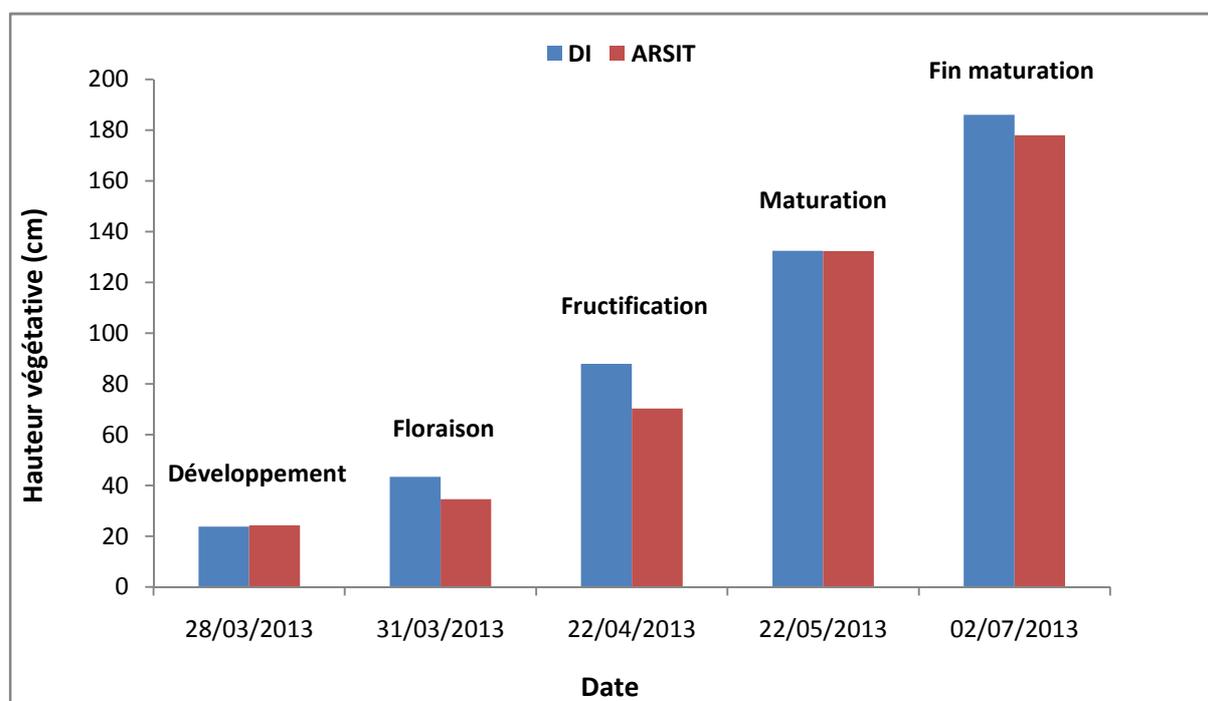


Figure 43: Evolution de la hauteur végétative de la tomate irriguée par ARSIT et DI

Les valeurs de la hauteur de la tige entre la tomate irriguée avec le DI et ARSIT ne représentent pas des grands écarts. On remarque que dans les stades de développement et maturation, les hauteurs mesurées sont les mêmes pour la tomate irriguée avec le DI et la tomate irriguée avec l'ARSIT, qui sont respectivement 24 cm et 132 cm. Pour les stades de floraison, fructification et fin maturation les hauteurs de la tomate irriguée par DI sont supérieures à celles irriguées par ARSIT, avec une hauteur maximale atteinte à la fin du cycle de 186 cm pour la tomate irriguée par DI et 178 cm pour la tomate irriguée par ARSIT.

D'après les résultats trouvés on peut dire que la hauteur de la tomate irriguée par ARSIT est acceptable puisque la hauteur de la tomate est entre 150 à 200 cm.

2-2-Comparaison des températures du couvert végétal

La figure ci-dessous présente les températures maximales de l'air et les températures du couvert végétal de la tomate irriguée par ARSIT et par DI.

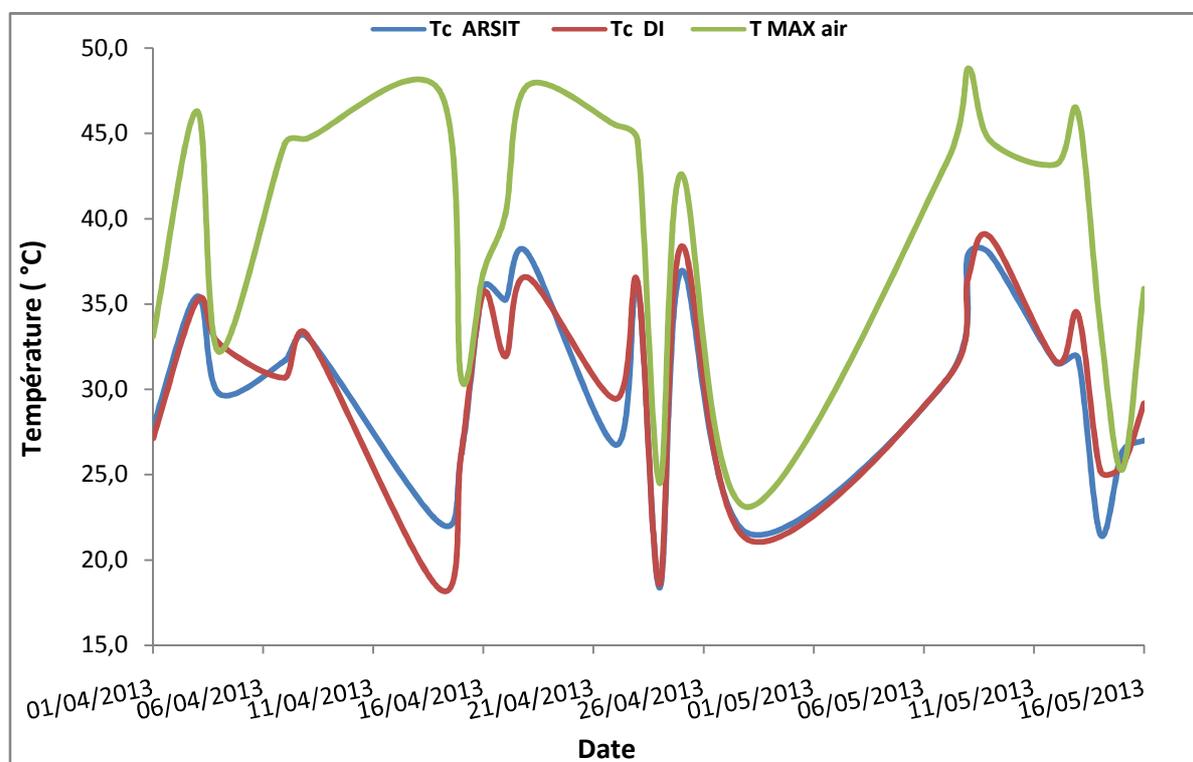


Figure 44 : Evolution de la température du couvert végétal de la tomate irriguée par ARSIT et DI

D'après la figure 44, les valeurs de la température de l'air sont supérieures aux températures du couvert végétal de la tomate irriguée par ARSIT et DI. La température moyenne de l'air est estimée à 39,3 °C et pour la température moyenne du couvert végétal de la tomate irriguée par ARSIT et DI sont respectivement 30,4 °C et 30,6°C.

À partir de ces résultats et l'aspect de la fluctuation des trois graphes, on remarque qu'il y a une superposition entre le graphe des températures de couvert végétal de DI et celles d'ARSIT. Ainsi la tomate irriguée par ARSIT et DI a été conduite en confort hydrique puisque les températures du couvert végétal mesurées au midi solaire sont inférieures aux températures maximales de l'air.

2-3-Comparaison des rendements entre ARSIT et DI

La figure 45 illustre l'évolution des rendements des deux systèmes ARSIT et DI pour une surface de 120 m².

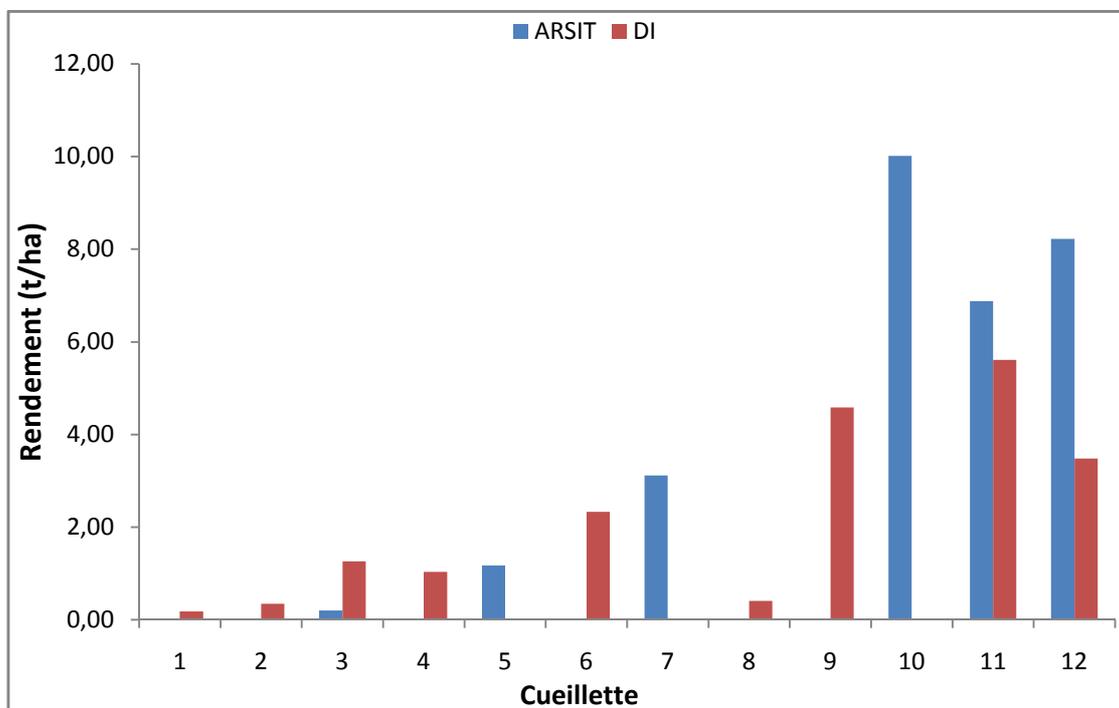


Figure 45: Rendement de la tomate irriguée par ARSIT et DI

Selon le graphe on remarque que le rendement de la tomate irriguée par ARSIT présente six cueillettes par rapport à neuf cueillettes de la tomate irriguée par DI. La tomate irriguée par ARSIT n'est rentrée en production qu'à partir de la cinquième cueillette, ensuite à partir de la dixième cueillette le rendement d'ARSIT dépasse celui de DI. Le rendement total du système ARSIT est de 30 t/ha, alors que celui du système DI est de 19 t/ha. Et selon l'ITCMI (2010) le rendement de la tomate sous serre irriguée par goutte à goutte est d'environ 80 à 110 t/ha.

2-4-Comparaison du volume d'irrigation apporté par ARSIT et DI

La figure ci-dessous représente les volumes cumulés d'eau d'irrigation apportés par ARSIT et DI pour une surface irriguée de 120 m².

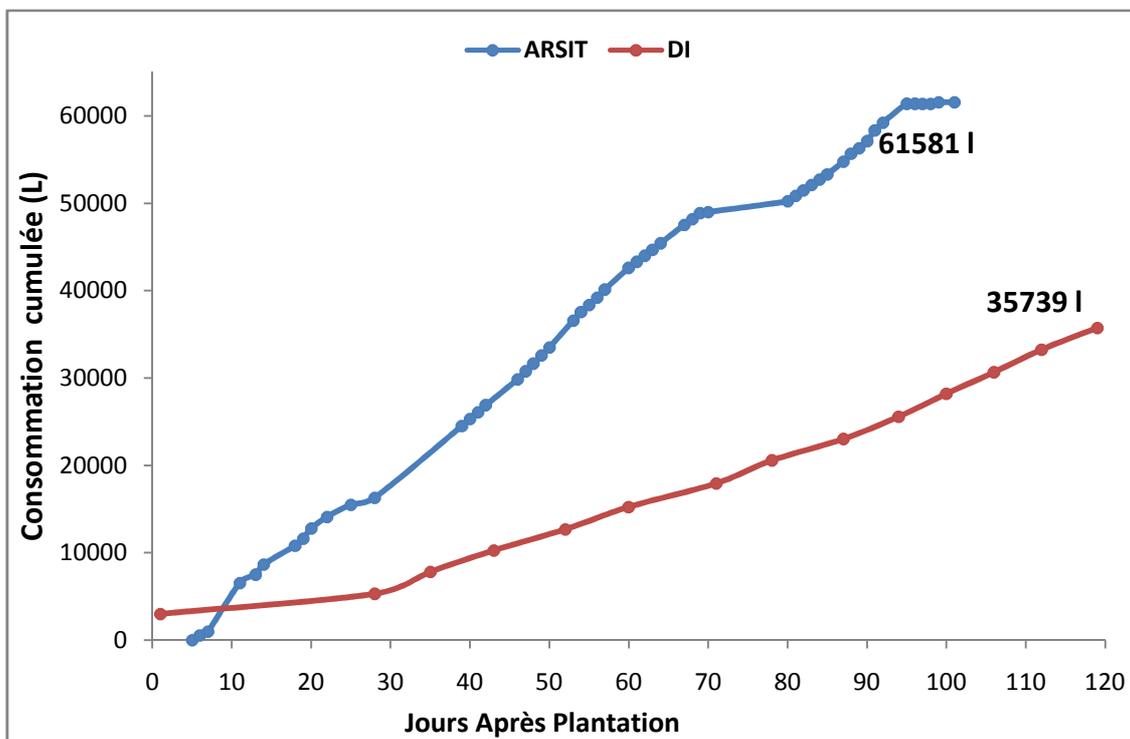


Figure 46 : Consommation cumulée en eau d'irrigation par ARSIT ET DI

La figure 46 montre qu'il y a une consommation en eau très importante par la technique ARSIT par rapport à la technique DI. La consommation en eau de la technique ARSIT est d'environ 61581 L pour une durée de mesure de 101 jours et la consommation en eau de la technique DI est d'environ 35739 L pour une durée de mesure de 123 jours. Cette consommation élevée peut s'expliquer par un problème dans le fonctionnement du système ARSIT.

3-5- Comparaison de l'efficacité d'irrigation de l'ARSIT et DI

Le calcul de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) et l'efficacité agronomique nous aiderons à mieux comprendre la réponse de la tomate irriguée par ARSIT et DI. Le tableau 17 présente les résultats des rendements moyens obtenus dans les deux serres et le volume d'eau d'irrigation apportée par chaque technique d'irrigation dans la serre n°1 (arrêt du compteur volumétrique de la serre n°2).

Tableau 17 : Résultats des efficacités des deux systèmes ARSIT et DI

| Système | ARSIT | DI |
|--|-----------|-----------|
| Surface (m ²) | 120 | 120 |
| Nombre de jours après plantation (jours) | 101 | 123 |
| Production (kg) | 355,482 | 228,397 |
| Consommation (mm) | 513,000 | 298,000 |
| Consommation (L) | 61581,000 | 35739,000 |
| Consommation (m ³) | 61,581 | 35,739 |
| Consommation (m ³ /ha) | 5131,750 | 2978,250 |
| Rendement (kg/m ²) | 2,962 | 1,903 |
| Rendement (kg/ha) | 29623,508 | 19033,111 |
| Rendement (t/ha) | 29,624 | 19,033 |
| WUE (kg/m ³) | 5,773 | 6,391 |
| EA (m ³ /kg) | 0,173 | 0,156 |

À partir des résultats présentés dans le tableau 17, on constate que l'efficacité de la technique ARSIT est pratiquement égale à l'efficacité de la technique DI, avec :

•Efficacité agronomique EA :

Pour produire un kg de tomate la technique ARSIT apporte 0,173 m³ d'eau

Pour produire un kg de tomate la technique DI apporte 0,156 m³ d'eau

•Efficacité de l'utilisation de l'eau WUE :

Un mètre cube d'eau apporté par la technique ARSIT produit 5,77 kg de tomates

Un mètre cube d'eau apporté par la technique DI produit 6,39 kg de tomates

Comme une première expérience et à partir de ces premiers résultats, on ne peut pas affirmer que l'efficacité de la technique ARSIT est faible ou élevée par rapport à l'efficacité de la technique DI. Donc il faut réaliser d'autres expériences pour déterminer les performances d'irrigation de la technique ARSIT.

3-Analyse du fonctionnement autorégulant de la technique ARSIT sur le terrain

3-1-Évolution de la teneur en eau dans le sol en fonction du temps

Les mesures des teneurs en eau du sol à différentes profondeurs ont permis de tracer les profils hydriques pour chaque date de prélèvement (voir figure 47).

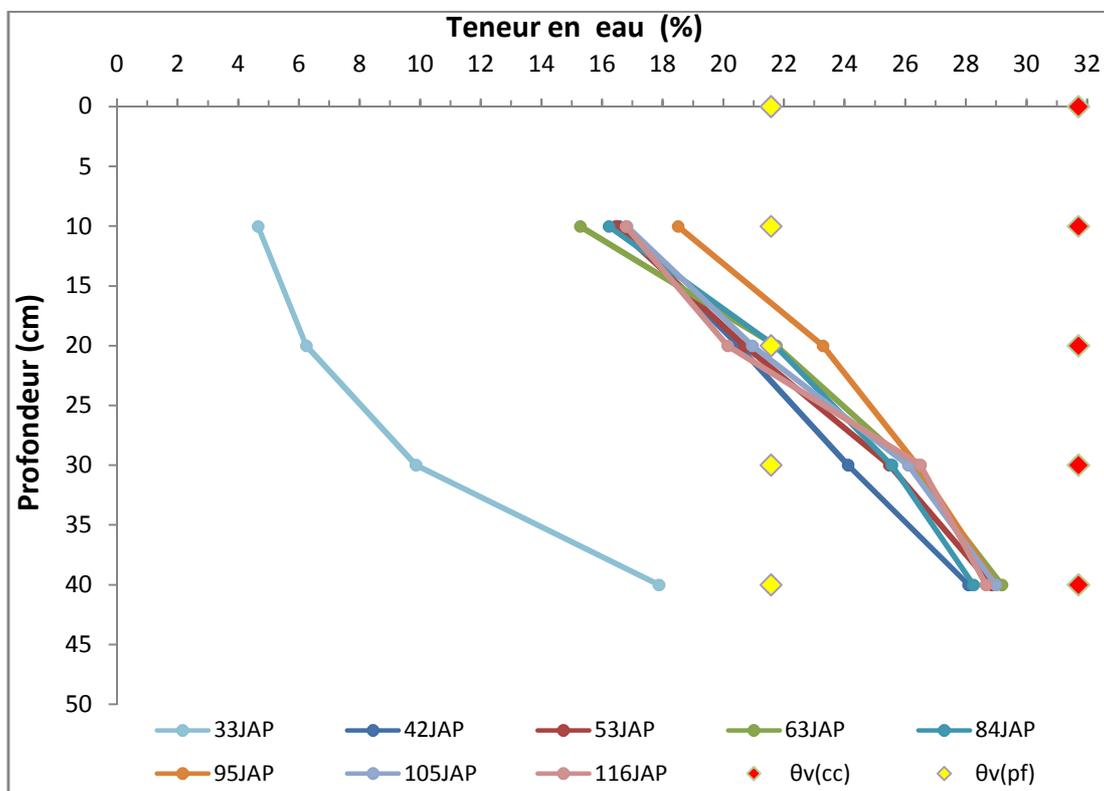


Figure 47 : Profils hydriques du sol pour chaque date de prélèvement

L'examen des profils a montré que, les teneurs en eau à 33 JAP (jours après plantation) sont inférieures à l'humidité au point de flétrissement (θ_{pf}) et ça dans toutes les profondeurs (10, 20, 30 et 40 cm). Ces teneurs varient de 6% à 18%. Les teneurs en eau à 42 JAP sont aussi inférieures à l'humidité au point de flétrissement (θ_{pf}) dans les profondeurs 10, 20 et 30 cm, les teneurs en eau sont respectivement 15%, 18,5% et 21%. Dans la profondeur 40 cm la teneur en eau supérieure au point de flétrissement et inférieure à l'humidité à la capacité au champ (θ_{cc}) avec 26% d'humidité.

Pour les profils hydriques à 53 ; 105 et 116 JAP les teneurs en eau sont inférieures au point de flétrissement (θ_{pf}) dans les profondeurs 10 et 20 cm, elles varient respectivement de 15,5 à 18,5% et de 20 à 21%. D'autre par dans les mêmes profondeurs les profils hydriques à 63 ; 84 et 95 JAP présentent des teneurs en eau supérieures à l'humidité au point de

flétrissement (θ_{pf}), elles sont estimées de 21,6% à 23%. Et dans les profondeurs de 30 et 40 cm, les teneurs en eau de 53 JAP au 116 JAP se trouvent entre les deux limites de l'humidité du sol (θ_{pf} et θ_{cc}) avec des teneurs de 24 à 26 % à la profondeur de 30 cm et de 28 à 29 % à la profondeur de 40 cm.

D'après les résultats des profils hydriques on peut dire que la conduite ARSIT a maintenu les mêmes intervalles de variation de la teneur en eau en fonction du temps, avec des teneurs en eau faibles dans les profondeurs 10 et 20 cm qui sont d'origine de dessèchement progressif des couches supérieures par évaporation et la forte consommation des racines, contrairement aux profondeurs 30 et 40 cm où l'extraction racinaire est faible et les teneurs en eau sont élevées.

3-2-Évolution spatio-temporelle de la teneur en eau dans le sol

Les mesures des teneurs en eau du sol à différentes profondeurs ont permis de tracer des courbes d'iso-valeurs d'humidité et interpoler les valeurs intermédiaires à l'aide de la méthode d'interpolation triangulation avec lissage intégrée dans le logiciel MapInfo. La figure 48 illustre la distribution transversale de la teneur en eau dans le sol autour de la conduite ARSIT pour sept dates de prélèvement, à des profondeurs de 10 ; 20 ; 30 et 40 cm et avec une distance radiale de 40 cm de par et d'autre des plants de la tomate.

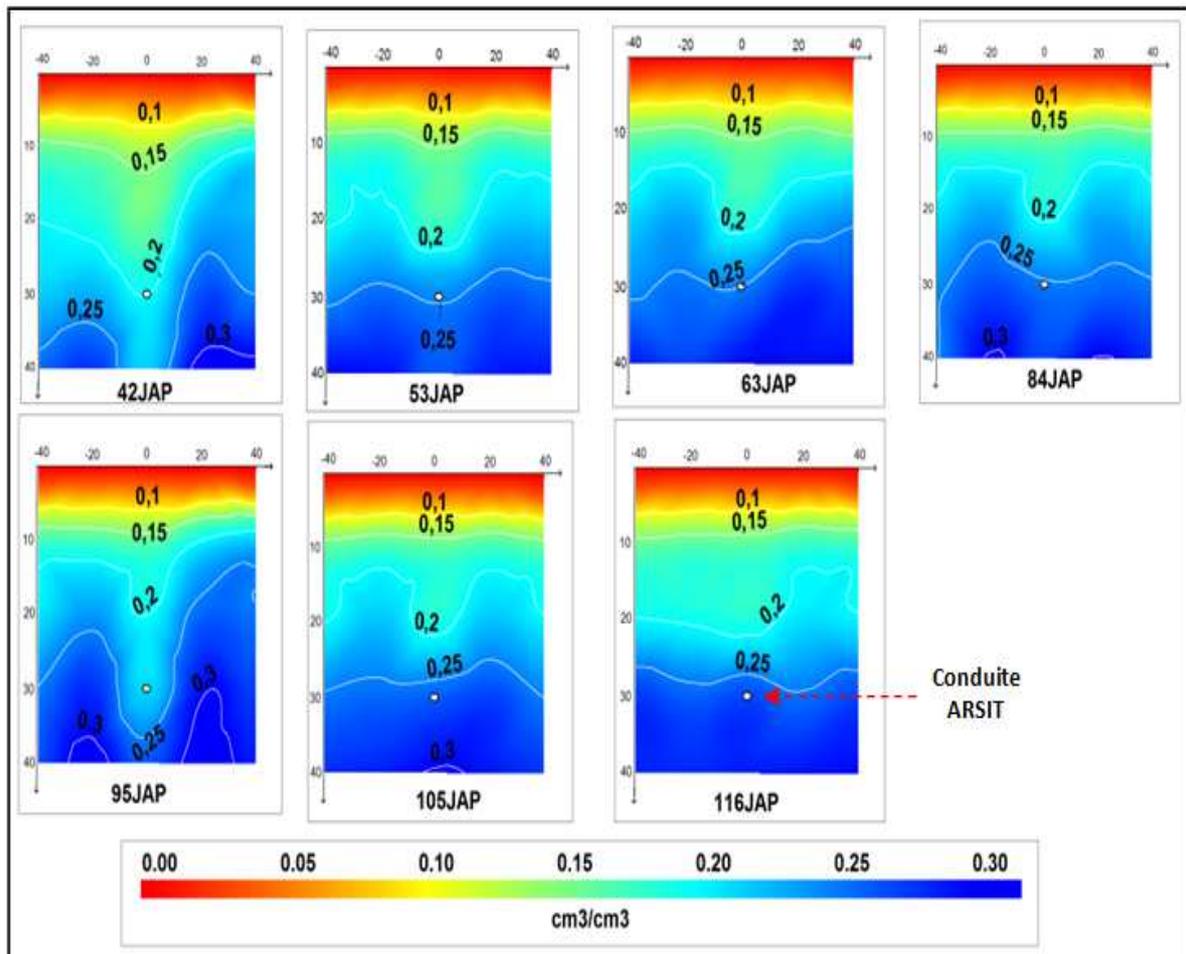


Figure 48 : Configuration de la distribution transversale de la teneur en eau dans le sol autour de la conduite ARSIT

L'analyse de la distribution de la teneur en eau a montré qu'au 42 JAP, 53 JAP et 63 JAP dans les couches 10 cm à 20 cm la teneur en eau est inférieure au point de flétrissement, elle est de l'ordre de 16% à 10 cm et 20,5% à 20 cm. Dans la couche de 30 cm la teneur en eau est supérieure au point de flétrissement, elle est d'ordre de 23%. Dans la couche de 40 cm les teneurs en eau présentent les mêmes valeurs qui dépassent le point de flétrissement avec des humidités qui atteignent les 28%.

Les teneurs en eau dans le sol à 84 JAP et 95 JAP sont plus élevées par rapport aux dates du prélèvement précédent. Dans la couche de 10 cm les teneurs sont inférieures à l'humidité au point de flétrissement (θ_{pf}) environ 18% et pour les couches 20 cm à 30 cm les teneurs en eau dépassent le point de flétrissement (θ_{pf}). Ces teneurs sont estimées respectivement à 22% et 24%. Et dans la couche de 40 cm les teneurs en eau présentent un aspect homogène qui atteint 30%.

Les teneurs en eau dans le sol à 105 JAP et 116 JAP présentent les mêmes valeurs par rapport aux deux dates du prélèvement précédent et dans les couches de 30 cm à 40 cm les teneurs en eau dépassent les 27%.

D'après les résultats présentés on remarque que dans les couches de 10 cm à 30 cm la teneur en eau croit tout en s'éloignant du plant de la tomate, on peut expliquer ça par la présence d'une extraction racinaire au niveau de ces couches. Et pour la couche de 40 cm les teneurs en eau présentent les mêmes valeurs dues à l'absence de l'extraction racinaire. Constamment l'aspect de l'extraction racinaire apparait dans la couche 10 à 30 cm mais d'une façon plus faible dans les deux dernières dates de prélèvement. Cela est due à la diminution de l'extraction racinaire.

3-3-Évolution du stock d'eau

La figure 49 présente l'évolution du stock d'eau mesuré pour chaque date de prélèvement dans le sol pour une profondeur de 40 cm et l'évolution de la réserve en eau utile en fonction de la profondeur d'enracinement. Le tableau 18 présent les valeurs de la profondeur racinaire de la tomate mesurées sur terrain et les valeurs estimées.

Tableau 18 : Valeurs de la profondeur racinaire de la tomate pour chaque date de développement

| Date de prélèvement JAP | Stades | Profondeur racinaire (cm) | Origine de la valeur de la profondeur racinaire |
|-------------------------|----------------|---------------------------|---|
| 0 | Plantation | 5 | Mesurée |
| 33 | Floraison | 16,781 | Estimée |
| 42 | Nouaison | 20 | Mesurée |
| 53 | Fructification | 22,186 | Estimée |
| 63 | Fructification | 24,206 | Estimée |
| 84 | Fructification | 28,448 | Estimée |
| 95 | Maturation | 30,67 | Estimée |
| 105 | Maturation | 32,69 | Estimée |
| 116 | Maturation | 35 | Mesurée |

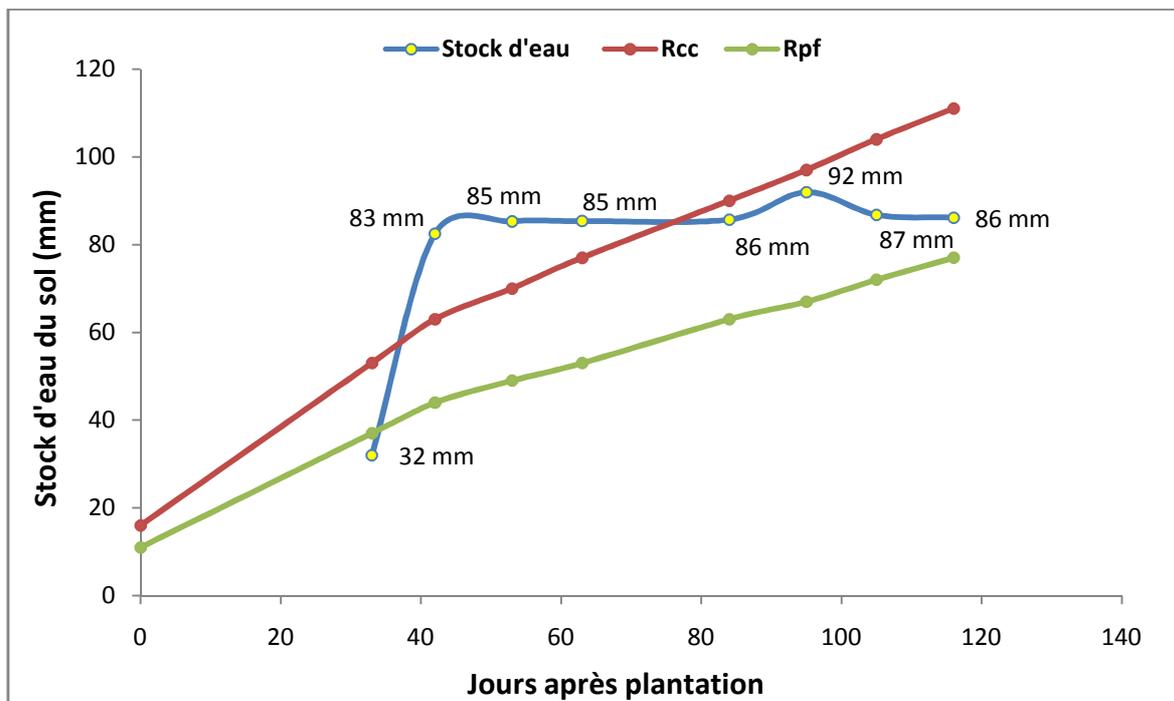


Figure 49 : Évolution du stock d'eau par rapport aux deux limites de la réserve en eau à 40 cm.

D'après la figure 49 le stock d'eau mesuré à 33 JAP (32 mm) est inférieur aux deux limites qui sont estimées respectivement à 37 mm au point de flétrissent (Rpf) et à 53 mm à la capacité au champ (Rcc). Contrairement aux trois dates de prélèvement qui suivent (42 ; 53 et 63 JAP) le stock d'eau mesuré dépasse la limite supérieure (Rcc), elle est d'environ 70 mm. Et pour les dates de 84 JAP, 95 JAP, 105 JAP et 116 JAP le stock d'eau mesuré est entre les deux limites avec une moyenne de 100 mm à la limite supérieure (Rcc) et avec une moyenne de 70 mm à la limite inférieure (Rpf).

On remarque aussi que le stock d'eau a augmenté de 50 mm entre le 33 JAP et 42 JAP. Ensuite le stock d'eau atteint 85 mm et il reste presque constant durant trois dates de prélèvement qui suivent (53 ; 63 et 84 JAP), jusqu'au 95 JAP le stock d'eau augmente de 6 mm, après le stock d'eau diminue de 5 mm pour le 105 JAP et 116 JAP. L'augmentation du stock d'eau dans le sol coïncide avec la période de nouaison, floraison et la formation des fruits (33 JAP au 53 JAP). Avec aussi la période de développement des fruits et les trois premières récoltes (63 JAP au 95 JAP). Dans ces périodes les besoins en eau de la culture sont très élevés (floraison, nouaison et fructification). Et pour la réduction du stock d'eau dans le sol elle coïncide avec la maturation totale des fruits (105 JAP au 116 JAP) où les besoins en eau de la culture diminuent.

A partir de tous les résultats présentés, la conduite ARSIT a mis la culture dans un confort hydrique de telle façon à maintenir le stock dans les deux limites de la réserve en eau du sol mais avec des stocks qui quelque fois dépassent la réserve à la capacité au champ. Donc il y a un problème dans le fonctionnement d'autorégulation de la technique ARSIT.

3-4-Estimation de la disponibilité de l'eau à la plante

L'enregistrement de la tension à différentes profondeurs (20, 30, 40 cm) et à différentes distances de la conduite (10, 20 cm), nous a permis de tracer des profils de tensions moyennes pour les deux distances pour chaque profondeur et d'analyser la disponibilité de l'eau au niveau des racines de la plante.

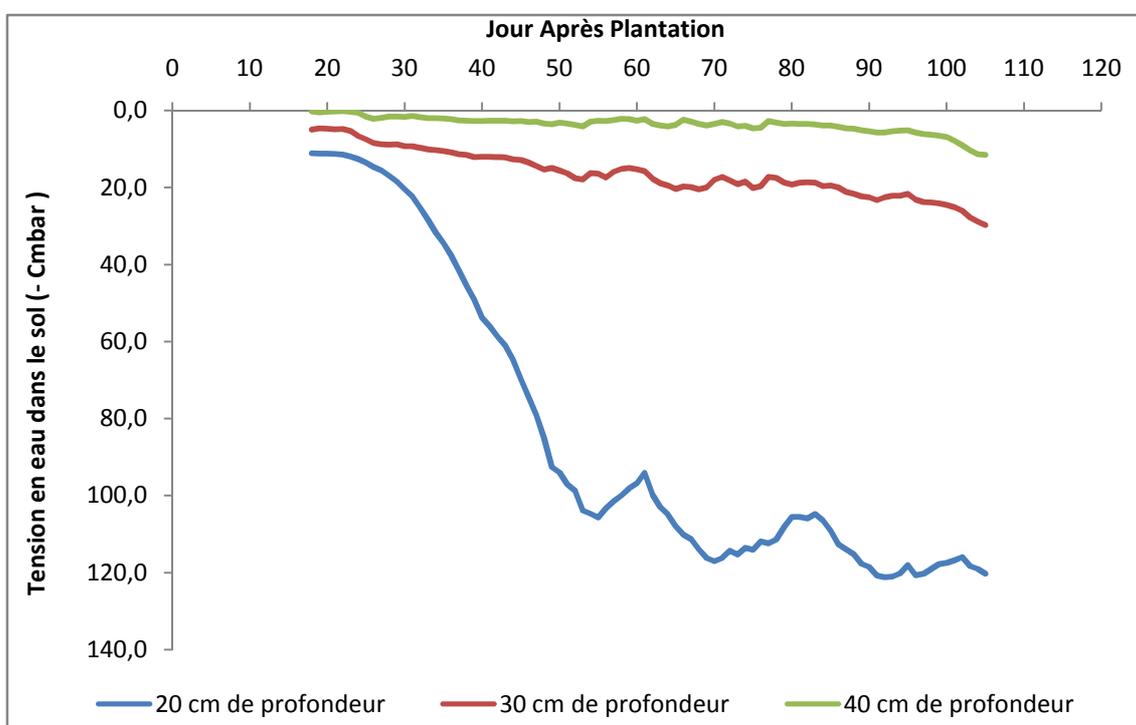


Figure 50 : Tensions de l'eau dans le sol en Cmbar

D'après la figure 50 les tensions enregistrées à 20 cm de profondeur varient de 10 à 120 cmbar et ont une tendance d'augmenter au fil du temps. Dans cette profondeur on assiste à des tensions un peu élevées qui mettent la plante dans un sol qui doit être irrigué, cela est dû à la présence de l'extraction racinaire et l'évaporation des couches supérieures. Et pour les tensions à 30 cm de profondeur, on remarque l'aspect de la variation des tensions dans le sol ont une tendance d'augmenter avec le temps de 5 à 30 cmbar. Ces tensions favorisent à la plante un sol suffisamment humide. Et dans la profondeur à 40 cm les tensions varient

de 0 à 15 cmbar. Ces faibles tensions dues à l'absence de l'extraction racinaire ce qui rend le sol saturé.

3-5-Estimation de la direction de l'écoulement

Les enregistrements de la tension en eau du sol ont permis aussi de tracer le profil de charge pour chaque date de prélèvement de la teneur en eau (voir figure 51).

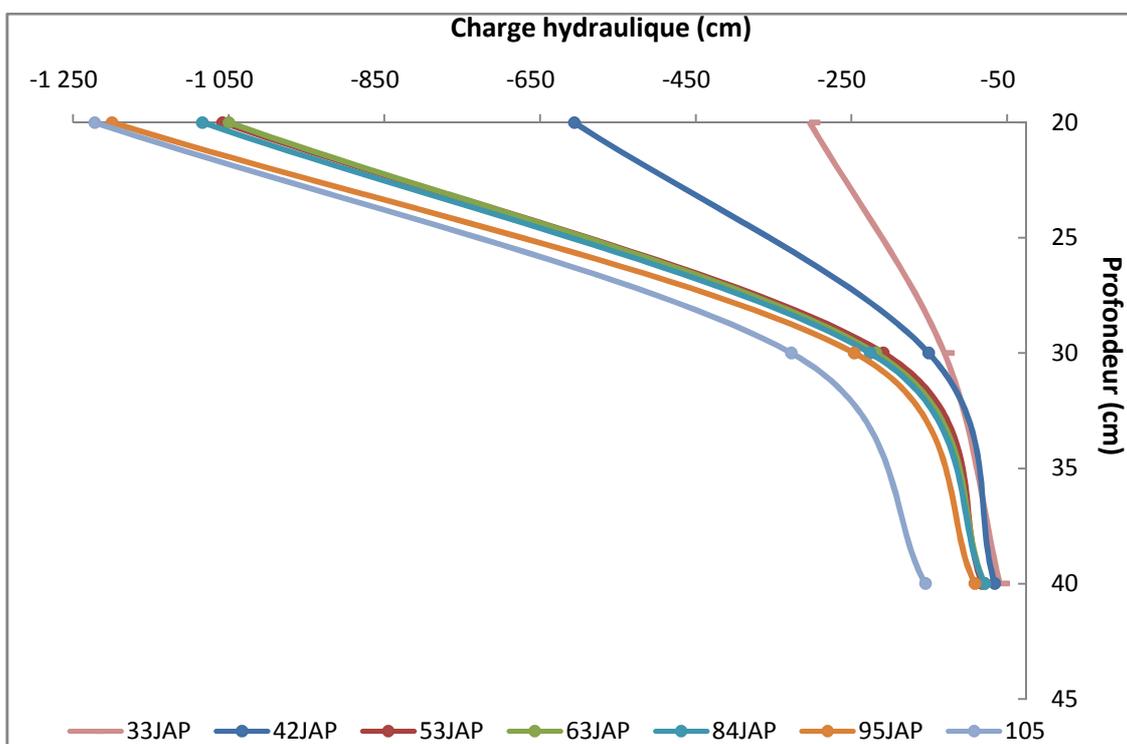


Figure 51: Profil de charge de chaque date de prélèvement

D'après l'aspect des profils de charge de chaque date de prélèvement le flux d'eau est ascendant de la profondeur 40 cm vers la profondeur 20 cm. Le flux ascendant dans la couche 30-40 cm est dû à la remonté capillaire de l'eau de la charge la plus grande à 40 cm vers la charge la plus faible à 30 cm, malgré que la source d'eau se trouve à 30 cm. On peut expliquer ça par la présence d'un cumul de l'eau drainée par la conduite ARSIT dans les couches profondes (une diffusion latérale de la conduite). Et pour le flux ascendant dans les couches de 30 cm vers les couches de 20 cm est d'origine de l'extraction racinaire (une diffusion verticale de la conduite) et la remonté capillaire du flux des couches plus profondes. On remarque aussi que la charge hydraulique dans les trois profondeurs diminue d'une date de prélèvement précédente à la date qui suit. Mais la pente de gradient hydraulique augmente d'une date à l'autre avec un flux qui reste régulièrement ascendant (

$\frac{dH}{dz} > 0$). Par exemple la charge hydraulique au 33 JAP dans les profondeurs de 40 ; 30 et 20 cm sont respectivement -60 ; -151 et -303 cmbar et au 105 JAP sont respectivement -155 ; -328 et -1228 cmbar. On peut expliquer ça par l'augmentation de la demande en eau de la culture d'un stade à l'autre et parallèlement il y avait une croissance de la surface racinaire. Ainsi vont augmenter la surface de succion (extraction racinaire de l'eau dans le sol), ensuite ce dernier va provoquer le flux ascendant ($\frac{dH}{dz} > 0$) et la diminution de la charge hydraulique (H).

3-6-Analyse des doses d'irrigations délivrées par les conduites ARSIT en fonction de la demande en eau de la culture

La figure ci-dessous présente les doses d'irrigation journalières délivrées par les conduites ARSIT pour une surface de 120 m² et la demande en eau de la culture de la tomate ETM journalière (voir annexe C).

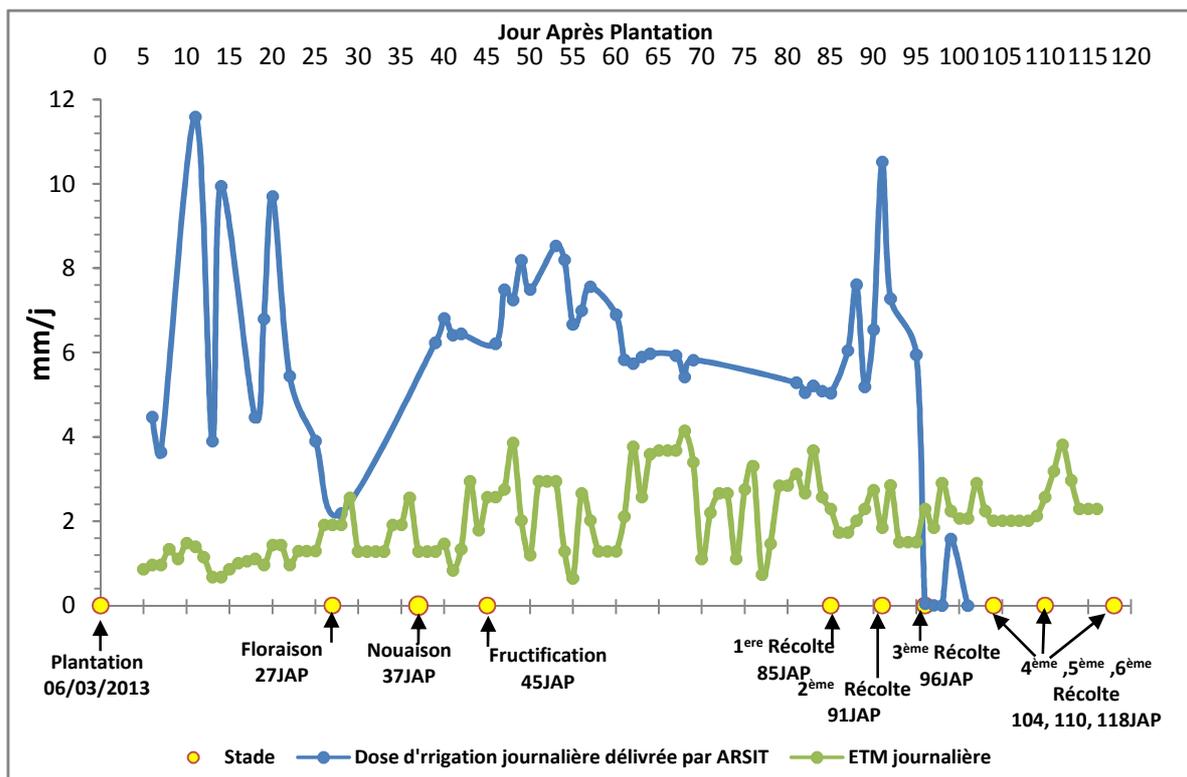


Figure 52: Evolution des doses d'irrigations journalières délivrées par les conduites ARSIT

On peut diviser le graphe en trois phases, la 1^{ère} phase de la plantation jusqu'à la floraison (0 JAP-27 JAP), la 2^{ème} phase de la floraison jusqu'à 1^{ère} récolte (27 JAP-85 JAP) et la 3^{ème} phase de la 1^{ère} récolte jusqu'à la sixième récolte (85 JAP-118 JAP).

Première phase : Dans cette première phase on constate que la somme des doses d'irrigation délivrées par les conduites ARSIT comparativement aux besoins de la plante qui sont faibles (31 mm). La dose d'irrigation totale délivrée est d'environ 129,2 mm avec un rythme de consommation moyen de 6,38 mm/j. Dans cette phase la conduite a développé une relation entre elle et le stock d'eau du sol, de telle façon de charger la réserve en eau du sol à chaque fois qu'il y a des pertes.

Deuxième phase : Dans la deuxième phase on remarque que la demande en eau de la culture a augmenté (133,18 mm). Et pour la dose d'irrigation totale délivrée par les conduites ARSIT reste élevée d'environ 315,242 mm avec un rythme de consommation moyen de 5,93 mm/j. Mais on constate que les deux courbes représentent les mêmes aspects de la variation, c'est-à-dire que quand la demande en eau de la culture est importante les conduites délivrent plus de l'eau et quand il y a une faible demande les conduites délivrent moins d'eau. Donc dans cette phase la conduite ARSIT arrive à l'autorégulation de l'humidité du sol selon la demande en eau de la plante.

Troisième phase : Dans la dernière phase on constate que l'ETM a diminué (70 mm) et elle reste constante. Et pour la dose totale d'irrigation délivrée par les conduites ARSIT a aussi diminuée jusqu'à s'annuler vers la fin. La dose totale d'irrigation délivrée est estimée à 68,733 mm avec un rythme de consommation moyen de 4,23 m/j.

D'après tous les résultats présentés, on remarque que dans la première phase les conduites ARSIT essaient de charger la réserve en eau de telle façon d'avoir un sol moyennement humide (humidité à la capacité au champ) et à chaque fois qu'il y a un dessèchement de la réserve les conduites ARSIT vont libérer de l'eau pour compenser les pertes d'eau. On remarque ça par les trois pics successifs dans la première phase (11 mm/j pour le 11 JAP, 9,5 mm/j pour le 14 JAP et 9,5 pour le 20 JAP). Les pertes d'eau sont dues en grande partie à l'évaporation du sol et l'écoulement de l'eau en profondeur. Et une petite partie des pertes dues à la transpiration de la plante qui sont négligeables. Parce que dans cette phase la demande en eau de la plante est faible et aussi la profondeur d'extraction racinaire est faible (environ 10 cm) qui n'atteint pas à extraire de l'eau diffusée par la conduite à une profondeur de 30 cm. A la fin de la première phase les conduites ARSIT ramènent la réserve en eau du sol à une humidité idéale pour la croissance de la plante (humidité à la capacité au champ) et dans la deuxième phase les conduites ARSIT ont maintenu la réserve en eau du sol

à cette humidité. D'une telle façon de compenser les pertes d'eau de la réserve dues à la demande en eau de la culture. Parce que cette phase elle coïncide avec les stades de floraison, nouaison et fructification où la demande en eau des plantes est importante, ainsi un système racinaire bien développé, environ 25 cm. Mais les doses délivrés par les conduites ARSIT sont très importants comparativement aux besoins en eau de la plante, probablement que ça est due à des quantités d'eau importantes qui sont drainées en profondeur. Dans la troisième phase on remarque qu'il y a une baisse de la demande en eau de la culture (coïncide avec la maturation totale des fruits) et la conduite ARSIT délivre des petites doses d'eau (pour recharger la réserve en eau du sol) jusqu'à s'annuler vers la fin, probablement que ça est due à la baisse de la demande en eau de la plante et saturation du sol.

3-7-Analyse des débits délivrés par ARSIT en fonction des tensions en eau du sol

Afin d'examiner le fonctionnement de la conduite ARSIT à l'autorégulation de l'humidité du sol à des humidités optimums pour la croissance de la plante (au voisinage de la capacité au champ) durant la deuxième phase. On a essayé de vérifier la relation débit de l'eau délivré par la conduite ARSIT et la tension en eau dans le sol. Cette relation (débit-tension) a été déjà évaluée au laboratoire (voir figure 14). La figure 53 présente la relation entre le débit de la conduite ARSIT en fonction de la tension en eau dans le sol.

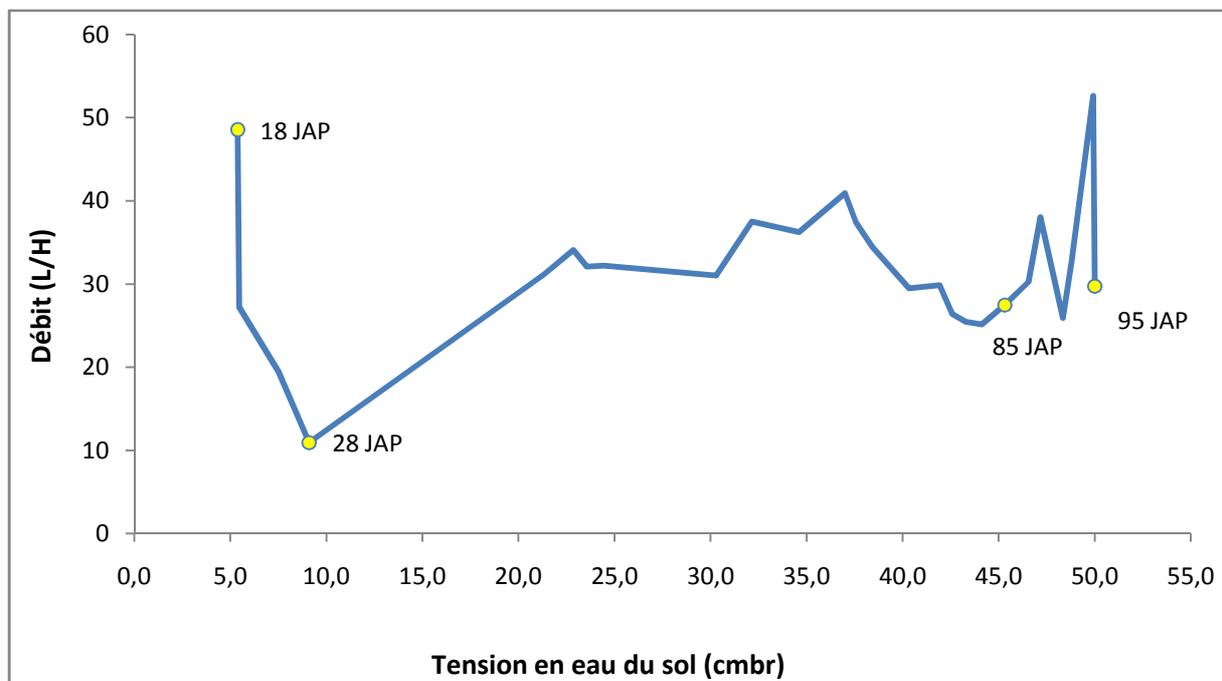


Figure 53 : Débit délivré par la conduite ARSIT en fonction de la tension en eau du sol

On remarque d'après la figure 53, que dans la période du 18 JAP au 28 JAP les tensions en eau du sol varient entre 0 et 9 cmbar (0 à 90 hPa) avec un débit moyen délivré d'environ 32 l/h. Et dans la période de 28 JAP au 85 JAP, les tensions en eau du sol varient entre 9,1 à 44,1 cmbar (91 à 441 hPa) et le débit moyen fournit par la conduite est d'environ 30 l/h. Dans la période du 85 JAP au 95 JAP les tensions en eau du sol varient entre 46,5 à 50 cmbar (465 à 500 hPa) avec un débit moyen délivré d'environ 35 l/h.

Donc la conduite ARSIT dans la première période va essayer de charger la réserve en eau du sol à des tensions favorisant un sol moyennement humide. Ensuite la conduite veille à maintenir cette humidité dans le sol (un sol moyennement humide). Cette période c'est la période la plus importante et la plus longue, dans laquelle la demande en eau des cultures est élevée et la conduite ARSIT va essayer d'auto-régulariser l'humidité du sol au voisinage des humidités optimums pour la croissance de la plante (capacité au champ). D'après les résultats trouvés au laboratoire (voir figure 14) et nos résultats, on peut dire que dans notre expérience la conduite ARSIT est arrivée à auto-régulariser l'humidité du sol à des tensions comprises entre 100 et 450 hPa, ainsi ces tensions favorisent un sol moyennement humide et optimum pour la croissance de la plante. Et cette période (de 28 JAP au 85 JAP) coïncide avec les stades de floraison, nouaison et fructification où la demande en eau des plantes est importante.

3-8-Analyse du fonctionnement de l'installation ARSIT sur le terrain

Notre protocole expérimental adopté à notre étude consiste à installer les conduites d'ARSIT à une profondeur de 30 cm au-dessous du sol. Et pour assurer un bon fonctionnement de la conduite ARSIT sur le terrain nous avons respecté toutes les exigences de l'installation de cette technique. Nous avons assuré l'hydrophilation des conduites, assuré une pression hydrostatique à l'intérieur des conduites inférieure à 0,1 bar et assuré une eau de bonne qualité.

À travers l'analyse des résultats trouvés on peut dire que la conduite ARSIT a maintenu la culture dans un confort hydrique sous un régime d'autorégulation. Mais les volumes délivrés par ARSIT sont très importants comparativement à la demande en eau de la culture (voir figures 46 et 52). On peut expliquer ce problème par la présence des grandes quantités d'eau drainées en profondeur en raison d'un mauvais fonctionnement de la technique d'ARSIT sur le terrain. Le mauvais fonctionnement de la technique d'ARSIT probablement il est lié à l'une des exigences de l'installation d'ARSIT qui ne sont pas respectées ou un problème dans le protocole expérimental adopté. Pour la condition de l'hydrophilation et la filtration ont été bien respectés car il y avait une diffusion continue de l'eau à travers les conduites et il n'y avait pas un colmatage des conduites durant toute la période de l'expérience. Cependant la profondeur de l'installation des conduites sous sol (30 cm) et la charge hydrostatique appliquée sur les conduites (0,07 bar) peuvent provoquer le mauvais fonctionnement de la technique ARSIT puisque :

-La profondeur de la conduite elle retarde le commencement de la contribution de l'extraction racinaire, ce retard il influence sur la quantité d'eau drainée.

-La charge hydrostatique appliquée sur les conduites influence sur la vitesse de diffusion de l'eau à travers les parois de la conduite et la quantité d'eau libérée dans le sol.

En conséquence on propose d'adopter une autre installation des conduites ARSIT sur le terrain, afin d'avoir un fonctionnement autorégulant de la technique ARSIT plus correct :

-Diminuer la profondeur des conduites sous sol de 30 cm à 15 cm pour permettre aux racines de commencer rapidement l'extraction racinaire efficace et d'influence sur la direction de la diffusion afin de réduire la quantité d'eau drainée en profondeur.

-Diminuer la charge hydrostatique appliquée sur les conduites ($< 0,07$ bar) pour réduire la vitesse de diffusion de l'eau à travers la conduite. Parce que si on modifie que la profondeur de la conduite et on ne diminue pas la charge hydrostatique, il va y avoir constamment des quantités d'eau importantes délivrées par la conduite qui ne dépend pas de l'humidité du sol optimum pour la croissance de la plante.

-Diminuer la distance entre les plants de la tomate de 50 cm à 35 cm pour créer un chevauchement entre les racines, afin d'exploiter toute la surface de la diffusion de l'eau de la conduite. Et favoriser une diffusion verticale ascendante très importante par rapport à la diffusion verticale descendante pour réduire les quantités d'eau drainées en profondeur.

A la fin pour mieux déterminer les performances de la technique ARSIT, il faut réaliser d'autres études sur la dynamique de l'eau dans le sol. Avec la réalisation des suivis de la teneur en eau du sol et la tension en eau du sol à différentes profondeurs de la conduite (10-80 cm) et à différentes distances radiales de la conduite (50 cm de part et d'autre de la conduite). Afin de déterminer son rayon de diffusion latérale et verticale.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet BMBF portant sur la mise en essai d'une technique d'irrigation souterraine avec membrane autorégulante ARSIT (irrigation technology by auto-regulative subsurface pipes) à fin d'analyser sa fiabilité à l'irrigation dans des conditions naturelles.

Dans notre étude nous avons mis en œuvre un protocole expérimental qui nous a permis de tester cette technique innovante pour l'irrigation de la tomate sous serre et la confronter avec la technique d'irrigation de surface DI pilotée dans les mêmes conditions techniques. Notre protocole expérimental nous a permis de tester le fonctionnement de la technique ARSIT et vérifier la spécificité de la technique à l'autorégulation de l'humidité du sol. Tout en réalisant des mesures de la teneur en eau, des suivis de la tension en eau du sol et des mesures agronomiques sur la culture. Ensuite les résultats de ces mesures vont nous permettre d'apprécier l'évolution de la variation du stock d'eau dans le sol, d'analyser la disponibilité de l'eau pour la plante, d'estimer la réponse de la culture à une telle irrigation et de comparer entre la technique souterraine ARSIT et la technique de surface DI en terme de consommation en eau et du rendement.

Les résultats trouvés à travers les suivis et les mesures effectuées sur le terrain durant notre expérience ont permis d'aboutir aux observations suivantes :

-La technique ARSIT a mis la culture de la tomate dans un confort hydrique, en constatant ça d'après les résultats des températures foliaires de la tomate, qui sont inférieures aux températures maximales de l'air, ainsi elle a varié de la même façon des températures de la tomate irriguée avec la technique DI. Et également pour les résultats de la hauteur végétale de la tomate, qui sont acceptables aux hauteurs habituelles de la tomate. Et pour le rendement de la tomate obtenu par la technique ARSIT (30 t/ha) est plus grand que celui obtenu par la technique DI (19 t/ha). Mais le rendement des deux techniques est inférieur à la barre de rendement de la tomate sous serre en Algérie qui est d'environ 80 à 110 t/ha (ITCM, 2010).

-La technique ARSIT a maintenu le stock d'eau dans le sol durant le cycle végétatif de la tomate dans ses deux limites de la réserve en eau du sol mais avec des stocks de fois qui dépassent la réserve à la capacité au champ. Et avec des teneurs en eau faibles dans les

profondeurs 10 à 20 cm et des teneurs en eau élevées dans les profondeurs 30 à 40 cm. Et aussi la technique ARSIT a favorisé des tensions en eau dans le sol faibles avec une direction de flux ascendant des couches profondes (humides) vers les couches de surface (moins humide).

-la technique ARSIT a auto-régularisé l'humidité du sol à des tensions qui favorisent la croissance de la plante (91 hPa et 441 hPa). Cependant les conduites ARSIT ont délivrés beaucoup d'eau comparativement aux besoins en eau de la culture, en constatant ça par la comparaison de la consommation en eau entre ARSIT qui est élevée (61580L) par rapport à la consommation DI qui est faible (35739L).

À partir des résultats trouvés dans cette expérience, on ne peut pas tirer des conclusions finales sur les performances d'irrigation de la technique ARSIT. De ce fait cette technique a besoin d'être essayée avec d'autres protocoles expérimentaux, dont le choix de la profondeur de l'emplacement des conduites sous sol est bien déterminé et l'aspect de la pression hydrostatique est bien maîtrisé sur l'installation de la technique ARSIT dans le terrain. Afin d'arriver à des résultats qui confirment les résultats trouvés dans le laboratoire sur la technique ARSIT et mieux comprendre son fonctionnement.

Cette expérience a apporté énormément d'informations sur la manière de fonctionnement autorégulant des conduites ARSIT en relation avec la dynamique de l'eau dans le sol et les besoins en eau de la culture. Ces informations seront utilisées comme une base pour approfondir dans d'autres études de recherche sur le mécanisme de la diffusion de l'eau à travers la conduite. Et d'un autre côté cette étude ouvre une autre piste de recherche dans le domaine de la gestion des ressources en eau en agriculture.

Références bibliographiques

Référence bibliographiques :

1-Abib F., Haddab H., 1995. Cartographie des sols de la ferme expérimentale de l'INA, Thèse d'ingénieur, INA, El-Harrach (Alger), 89 P.

2-Ait alioua.N et Zaidi.A., 2013. Fonctionnement d'un système d'irrigation autorégulant dans deux contextes pédoclimatiques différents : cas de la tomate sous serre à Alger et Biskra, Thèse de Master en science de l'eau, ENSA, El-Harrach (Alger), 98 P.

3-Ait mesbah.H., 2013. Comparaison entre un système d'irrigation localisée traditionnel et un système innovant autorégulant, Thèse de Master en science de l'eau, El-Harrach (Alger), 80 P.

4-Bainbridge D A., 1997. Irrigation for remote sites, SERG: Soil Ecology and Restoration Group, 20 P. URL: <http://www.sci.sdsu.edu/SERG/techniques/Irrigation.pdf>

5-Bainbridge D.A., 2002. Alternative Irrigation Systems for Arid Land Restoration, Board of Regents of the University of Wisconsin System, 23-29 P. URL: http://www.gaiacollege.ca/course_content/Maintenance2/alternative_irrigation.pdf

6-Bainbridge D A., 2006. Deep pipe irrigation. Permanent Agriculture Resource, Holualoa, Hawaï, 08 P. URL: <http://agroforestry.net/pubs/Deep%20pipe%20irrigation.pdf>

7-Bainbridge D.A., Ramirez A., Jose J., 2008. More efficient irrigation systems for desert and dryland restoration, Marshall Goldsmith School of Management, Alliant Internacional University, San Diego, 11P. URL: http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/1154-P2-JJ_Ramirez_AlmorilACC.pdf

8-BENCHALAAI., 1983. Généralités sur la tomate, production végétale, production céréalière et fourragères. Aurès agronome, pp 2-6

9-Bouthein D., Boujelben A., Mguidiche A.B., Harrabi R., 2012. Dynamique de l'eau dans le sol sous un système d'irrigation localisée souterrain, Le journal de l'eau et de l'environnement, école nationale supérieure d'hydraulique (ENSH), Blida (Algérie), 29-43p.

10-CHOUX et FOURY c.I. Cultures légumières et maraichères tome 3 légumineuses potagères, légumes fruit, tec et doc Lavoisier, paris, 653 P.

11-Doorenbos J., Pruitt W.O., 1975. Les besoins en eau des cultures, Bulletin d'irrigation-drainage n°24, Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), Rome, PP 08 - 87.

12-Duehrkoop A., 2009. Innovative autoregulative subsurface irrigation with permeable pipes. Department of Agricultural Engineering in tropic and subtropic, University Kassel, Germany, 14P. URL: <http://www.tropentag.de/2009/abstracts/full/257.pdf>

13-FAO., 1997. Small-scale Irrigation for Arid Zones, Principles and Options, Rom, Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO).

URL: <http://www.fao.org/docrep/W3094E/w3094e00.htm>

14-FAO., 2010. Système mondial d'information sur l'eau et l'agriculture, Fiche d'information par pays (Algérie), AQUASTAT, Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexfra.stm>

15-ITCMI, 2010. Fiche technique valorisée des cultures maraichères et industrielles, Institut Technique des Cultures Maraichères et Industrielles, Algérie, 6 P.

URL: http://itcmidz.org/index_htm_files/TOMATE.pdf

16-Ghouli A., 2009. Modélisation Mathématique et Numérique de la Pollution dans un milieu poreux non Saturé, Application : Milieux Poreux Stratifiés. Thèse de doctorat. Université Mohammed V, Faculté des Sciences Rabat, Maroc, 145P. URL: http://toubkal.imist.ma/bitstream/handle/123456789/6959/THESE_GHOULI.pdf?sequence=1

17-INSID, 2013. Données climatiques de la station de dar el baida, Institut national des sols d'irrigation et du drainage, Algérie, 5P.

18-INSID, 2011. Fiche de présentation du laboratoire de contrôle des caractéristiques techniques des équipements d'irrigation, Institut national des sols d'irrigation et du drainage, Algérie, 11P.

19-Kahlaoui B., 2012. Réponse de la tomate au goutte à goutte enterré et en surface, Edition universitaire européennes, 55 p.

20-LAUMONNIER., 1979. Cultures légumières et maraichères, Edition Baillière, Tome3, PP 92-105

21-MADR., 2013. Ministère de l'Agriculture et du Développement, Direction des statistiques.

22-MADR., 2013. Ministère de l'Agriculture et du Développement, Direction de développement agricole des zone aride et semi-aride (DDAZSAD) .

23-Mezaour R., 2012. Etude des performances d'une technique d'irrigation innovante pour culture maraichère, Thèse d'ingénieur, ENSA, El-Harrach (Alger), 80 P.

24-NAIKA S., Jeude J.,Goffau M.(et al), 2005. La culture de la tomate : production, transformation et commercialisation, Edition Fondation Agronomique et CTA, Wageningen, 105 P.

25-NDIAYE B., 2000. Etude expérimentale des propriétés hydrodynamiques des sols cultivés par la méthode wind, Rapport de stage de recherches au laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, Grenoble, 68P. URL: http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/num-dakar-02/010023490.pdf

26-Ourkhou L., 2012. Evaluation des facteurs de variation de la rétention en eau des sols de la station expérimentale de l'ENSA, Thèse de Master en science du sol, ENSA, El-Harrach (Alger), 50 P.

27-Papadopoulos, A.P.1991. Growing greenhouse tomatoes in soil and in soilless media. Research Program Service, Communications Branch, Agriculture Canada Ottawa, 79 P. URL: <http://www.hydro-gardens.com/PDF%20Files/Growing%20GH%20Tomates.PDF>

28-REICH D., GODIN R., CHAVEZ J.L., BRONER I., 2009. Subsurface Drip Irrigation (SDI). Fort Collins: Colorado State University. 03 P. URL: <http://www.ext.colostate.edu/pubs/crops/04716.pdf>

29-Tamahjoubt.S., 2013. Les performances des deux technique d'irrigation DI et ARSIT, Thèse de Master en science de l'eau, ENSA, El-Harrach (Alger).

Autres références :

-INFONET-BIOVISION (Editor), 2010. Water for Irrigation, Zürich: Biovision. URL:<http://www.infonet-biovision.org/default/ct/293/soilConservation>

- THE HINDU** (Editor), 2008. An ingenious irrigation technique for small holdings. URL:
<http://www.hindu.com/seta/2008/04/10/stories/2008041050861600.htm>
- Agroforestry .net** (Editor), 2012. Wick irrigation for tree Establishment. URL:
<http://agroforestry.net/overstory/overstory249.html>
- Garden** (Editor), 2010. Poursous clay capsule irrigation. URL:
<http://www.darrolshillingburg.com/GardenSite/PorousClayCapsuleIrrigation.html>

Annexes

Annexe A : Volume d'eau d'irrigation consommé par DI

| Date irrigation | Jours après plantation | Dose, mm | Volume consommation, L | Volume cumulé, L |
|-----------------|------------------------|----------|------------------------|------------------|
| 28/02/2013 | 1 | 25 | 3000 | 3000 |
| 27/03/2013 | 28 | 19 | 2280 | 5280 |
| 03/04/2013 | 35 | 21 | 2550,24 | 7830,24 |
| 11/04/2013 | 43 | 20 | 2428,8 | 10259,04 |
| 20/04/2013 | 52 | 20 | 2417,76 | 12676,8 |
| 28/04/2013 | 60 | 21 | 2550,24 | 15227,04 |
| 09/05/2013 | 71 | 23 | 2704,8 | 17931,84 |
| 16/05/2013 | 78 | 22 | 2627,52 | 20559,36 |
| 25/05/2013 | 87 | 20 | 2450,88 | 23010,24 |
| 01/06/2013 | 94 | 22 | 2583,36 | 25593,6 |
| 07/06/2013 | 100 | 22 | 2616,48 | 28210,08 |
| 13/06/2013 | 106 | 20 | 2428,8 | 30638,88 |
| 19/06/2013 | 112 | 22 | 2627,52 | 33266,4 |
| 26/06/2013 | 119 | 21 | 2472,96 | 35739,36 |
| 30/06/2013 | 123 | 0 | 0 | 35739,36 |
| | | | Volume consommé, L | 35739,36 |
| | | | Volume consommé, mm | 298 |

Annexe B : Volume d'eau d'irrigation consommé par ARSIT

| Date | ΔT jour | Compteur m3 | Volume consommé m3 | Volume consommé cumulé m3 | Volume consommé L | volume consommé cumulé L |
|------------|------------|----------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| 11/03/2013 | 5 | 4,127 | 0,000 | 0,000 | 0 | 0 |
| 12/03/2013 | 6 | 4,663 | 0,536 | 0,536 | 536 | 536 |
| 13/03/2013 | 7 | 5,099 | 0,436 | 0,972 | 436 | 972 |
| 17/03/2013 | 11 | 10,664 | 5,565 | 6,537 | 5565 | 6537 |
| 19/03/2013 | 13 | 11,601 | 0,937 | 7,474 | 937 | 7474 |
| 20/03/2013 | 14 | 12,795 | 1,194 | 8,668 | 1194 | 8668 |
| 24/03/2013 | 18 | 14,940 | 2,145 | 10,813 | 2145 | 10813 |
| 25/03/2013 | 19 | 15,756 | 0,816 | 11,629 | 816 | 11629 |
| 26/03/2013 | 20 | 16,921 | 1,165 | 12,794 | 1165 | 12794 |
| 28/03/2013 | 22 | 18,228 | 1,307 | 14,101 | 1307 | 14101 |
| 31/03/2013 | 25 | 19,631 | 1,403 | 15,504 | 1403 | 15504 |
| 03/04/2013 | 28 | 20,420 | 0,789 | 16,293 | 789 | 16293 |
| 14/04/2013 | 39 | 28,643 | 8,223 | 24,516 | 8223 | 24516 |
| 15/04/2013 | 40 | 29,461 | 0,818 | 25,334 | 818 | 25334 |
| 16/04/2013 | 41 | 30,231 | 0,770 | 26,104 | 770 | 26104 |
| 17/04/2013 | 42 | 31,004 | 0,773 | 26,877 | 773 | 26877 |
| 21/04/2013 | 46 | 33,983 | 2,979 | 29,856 | 2979 | 29856 |
| 22/04/2013 | 47 | 34,883 | 0,900 | 30,756 | 900 | 30756 |
| 23/04/2013 | 48 | 35,753 | 0,870 | 31,626 | 870 | 31626 |
| 24/04/2013 | 49 | 36,735 | 0,982 | 32,608 | 982 | 32608 |
| 25/04/2013 | 50 | 37,635 | 0,900 | 33,508 | 900 | 33508 |
| 28/04/2013 | 53 | 40,708 | 3,073 | 36,581 | 3073 | 36581 |
| 29/04/2013 | 54 | 41,692 | 0,984 | 37,565 | 984 | 37565 |
| 30/04/2013 | 55 | 42,493 | 0,801 | 38,366 | 801 | 38366 |
| 01/05/2013 | 56 | 43,333 | 0,840 | 39,206 | 840 | 39206 |
| 02/05/2013 | 57 | 44,241 | 0,908 | 40,114 | 908 | 40114 |
| 05/05/2013 | 60 | 46,724 | 2,483 | 42,597 | 2483 | 42597 |
| 06/05/2013 | 61 | 47,424 | 0,700 | 43,297 | 700 | 43297 |
| 07/05/2013 | 62 | 48,113 | 0,689 | 43,986 | 689 | 43986 |
| 08/05/2013 | 63 | 48,821 | 0,708 | 44,694 | 708 | 44694 |
| 09/05/2013 | 64 | 49,538 | 0,717 | 45,411 | 717 | 45411 |
| 12/05/2013 | 67 | 51,672 | 2,134 | 47,545 | 2134 | 47545 |
| 13/05/2013 | 68 | 52,323 | 0,651 | 48,196 | 651 | 48196 |
| 14/05/2013 | 69 | 53,022 | 0,699 | 48,895 | 699 | 48895 |
| 15/05/2013 | 70 | 53,150 | 0,128 | 49,023 | 128 | 49022,6 |
| 25/05/2013 | 80 | 54,380 | 1,230 | 50,253 | 1230 | 50253 |
| 26/05/2013 | 81 | 55,014 | 0,634 | 50,887 | 634 | 50887 |
| 27/05/2013 | 82 | 55,620 | 0,606 | 51,493 | 606 | 51493 |
| 28/05/2013 | 83 | 56,245 | 0,625 | 52,118 | 625 | 52118 |
| 29/05/2013 | 84 | 56,856 | 0,611 | 52,729 | 611 | 52729 |
| 30/05/2013 | 85 | 57,460 | 0,604 | 53,333 | 604 | 53333 |
| 01/06/2013 | 87 | 58,912 | 1,452 | 54,785 | 1452 | 54785 |

| | | | | | | |
|------------|-----|--------|-------|--------|---------------------|---------|
| 02/06/2013 | 88 | 59,825 | 0,913 | 55,698 | 913 | 55697,9 |
| 03/06/2013 | 89 | 60,447 | 0,622 | 56,320 | 622 | 56320,1 |
| 04/06/2013 | 90 | 61,232 | 0,785 | 57,105 | 785 | 57105 |
| 05/06/2013 | 91 | 62,495 | 1,263 | 58,368 | 1263 | 58368 |
| 06/06/2013 | 92 | 63,368 | 0,873 | 59,241 | 873 | 59241 |
| 09/06/2013 | 95 | 65,511 | 2,143 | 61,384 | 2143 | 61384 |
| 10/06/2013 | 96 | 65,517 | 0,006 | 61,390 | 6 | 61390 |
| 11/06/2013 | 97 | 65,518 | 0,001 | 61,391 | 1 | 61391 |
| 12/06/2013 | 98 | 65,518 | 0,000 | 61,391 | 0 | 61391 |
| 13/06/2013 | 99 | 65,707 | 0,189 | 61,580 | 189 | 61580 |
| 15/06/2013 | 101 | 65,708 | 0,001 | 61,581 | 1 | 61581 |
| | | | | | Volume consommé, L | 61581 |
| | | | | | Volume consommé, mm | 513,18 |

Annexe C : Valeurs mesurées de l'évaporation du bac classe A

| Date | Ebac, mm | ETP, mm | ETM, mm | Date | Ebac, mm | ETP, mm | ETM, mm |
|------------|----------|---------|---------|------------|----------|---------|---------|
| 06/03/2013 | 1,9 | 1,52 | 0,912 | 03/05/2013 | 1,4 | 1,12 | 1,288 |
| 07/03/2013 | 1,8 | 1,44 | 0,864 | 04/05/2013 | 1,4 | 1,12 | 1,288 |
| 08/03/2013 | 3,2 | 2,56 | 1,536 | 05/05/2013 | 1,4 | 1,12 | 1,288 |
| 09/03/2013 | 3,2 | 2,56 | 1,536 | 06/05/2013 | 2,3 | 1,84 | 2,116 |
| 10/03/2013 | 1,9 | 1,52 | 0,912 | 07/05/2013 | 4,1 | 3,28 | 3,772 |
| 11/03/2013 | 1,8 | 1,44 | 0,864 | 08/05/2013 | 2,8 | 2,24 | 2,576 |
| 12/03/2013 | 2 | 1,6 | 0,96 | 09/05/2013 | 3,9 | 3,12 | 3,588 |
| 13/03/2013 | 2 | 1,6 | 0,96 | 10/05/2013 | 4 | 3,2 | 3,68 |
| 14/03/2013 | 2,8 | 2,24 | 1,344 | 11/05/2013 | 4 | 3,2 | 3,68 |
| 15/03/2013 | 2,3 | 1,84 | 1,104 | 12/05/2013 | 4 | 3,2 | 3,68 |
| 16/03/2013 | 3,1 | 2,48 | 1,488 | 13/05/2013 | 4,5 | 3,6 | 4,14 |
| 17/03/2013 | 2,9 | 2,32 | 1,392 | 14/05/2013 | 3,7 | 2,96 | 3,404 |
| 18/03/2013 | 2,4 | 1,92 | 1,152 | 15/05/2013 | 1,2 | 0,96 | 1,104 |
| 19/03/2013 | 1,4 | 1,12 | 0,672 | 16/05/2013 | 2,4 | 1,92 | 2,208 |
| 20/03/2013 | 1,4 | 1,12 | 0,672 | 17/05/2013 | 2,9 | 2,32 | 2,668 |
| 21/03/2013 | 1,8 | 1,44 | 0,864 | 18/05/2013 | 2,9 | 2,32 | 2,668 |
| 22/03/2013 | 2,1 | 1,68 | 1,008 | 19/05/2013 | 1,2 | 0,96 | 1,104 |
| 23/03/2013 | 2,2 | 1,76 | 1,056 | 20/05/2013 | 3 | 2,4 | 2,76 |
| 24/03/2013 | 2,3 | 1,84 | 1,104 | 21/05/2013 | 3,6 | 2,88 | 3,312 |
| 25/03/2013 | 2 | 1,6 | 0,96 | 22/05/2013 | 0,8 | 0,64 | 0,736 |
| 26/03/2013 | 3 | 2,4 | 1,44 | 23/05/2013 | 1,6 | 1,28 | 1,472 |
| 27/03/2013 | 3 | 2,4 | 1,44 | 24/05/2013 | 3,1 | 2,48 | 2,852 |
| 28/03/2013 | 2 | 1,6 | 0,96 | 25/05/2013 | 3,1 | 2,48 | 2,852 |
| 29/03/2013 | 2,7 | 2,16 | 1,296 | 26/05/2013 | 3,4 | 2,72 | 3,128 |
| 30/03/2013 | 2,7 | 2,16 | 1,296 | 27/05/2013 | 2,9 | 2,32 | 2,668 |
| 31/03/2013 | 2,7 | 2,16 | 1,296 | 28/05/2013 | 4 | 3,2 | 3,68 |
| 01/04/2013 | 4 | 3,2 | 1,92 | 29/05/2013 | 2,8 | 2,24 | 2,576 |
| 02/04/2013 | 3 | 2,4 | 1,92 | 30/05/2013 | 4,1 | 3,28 | 2,296 |
| 03/04/2013 | 3 | 2,4 | 1,92 | 31/05/2013 | 3,1 | 2,48 | 1,736 |
| 04/04/2013 | 4 | 3,2 | 2,56 | 01/06/2013 | 3,1 | 2,48 | 1,736 |
| 05/04/2013 | 2 | 1,6 | 1,28 | 02/06/2013 | 3,6 | 2,88 | 2,016 |
| 06/04/2013 | 2 | 1,6 | 1,28 | 03/06/2013 | 4,1 | 3,28 | 2,296 |
| 07/04/2013 | 2 | 1,6 | 1,28 | 04/06/2013 | 4,9 | 3,92 | 2,744 |
| 08/04/2013 | 2 | 1,6 | 1,28 | 05/06/2013 | 3,3 | 2,64 | 1,848 |
| 09/04/2013 | 3 | 2,4 | 1,92 | 06/06/2013 | 5,1 | 4,08 | 2,856 |
| 10/04/2013 | 3 | 2,4 | 1,92 | 07/06/2013 | 2,7 | 2,16 | 1,512 |
| 11/04/2013 | 4 | 3,2 | 2,56 | 08/06/2013 | 2,7 | 2,16 | 1,512 |
| 12/04/2013 | 2 | 1,6 | 1,28 | 09/06/2013 | 2,7 | 2,16 | 1,512 |
| 13/04/2013 | 2 | 1,6 | 1,28 | 10/06/2013 | 4,1 | 3,28 | 2,296 |
| 14/04/2013 | 2 | 1,6 | 1,28 | 11/06/2013 | 3,3 | 2,64 | 1,848 |
| 15/04/2013 | 2,3 | 1,84 | 1,472 | 12/06/2013 | 5,2 | 4,16 | 2,912 |
| 16/04/2013 | 1,3 | 1,04 | 0,832 | 13/06/2013 | 4 | 3,2 | 2,24 |
| 17/04/2013 | 2,1 | 1,68 | 1,344 | 14/06/2013 | 3,7 | 2,96 | 2,072 |

| | | | | | | | |
|------------|-----|------|-------|------------|-----|------|-------|
| 18/04/2013 | 4,6 | 3,68 | 2,944 | 15/06/2013 | 3,7 | 2,96 | 2,072 |
| 19/04/2013 | 2,8 | 2,24 | 1,792 | 16/06/2013 | 5,2 | 4,16 | 2,912 |
| 20/04/2013 | 2,8 | 2,24 | 2,576 | 17/06/2013 | 4 | 3,2 | 2,24 |
| 21/04/2013 | 2,8 | 2,24 | 2,576 | 18/06/2013 | 3,6 | 2,88 | 2,016 |
| 22/04/2013 | 3 | 2,4 | 2,76 | 19/06/2013 | 3,6 | 2,88 | 2,016 |
| 23/04/2013 | 4,2 | 3,36 | 3,864 | 20/06/2013 | 3,6 | 2,88 | 2,016 |
| 24/04/2013 | 2,2 | 1,76 | 2,024 | 21/06/2013 | 3,6 | 2,88 | 2,016 |
| 25/04/2013 | 1,3 | 1,04 | 1,196 | 22/06/2013 | 3,6 | 2,88 | 2,016 |
| 26/04/2013 | 3,2 | 2,56 | 2,944 | 23/06/2013 | 3,8 | 3,04 | 2,128 |
| 27/04/2013 | 3,2 | 2,56 | 2,944 | 24/06/2013 | 4,6 | 3,68 | 2,576 |
| 28/04/2013 | 3,2 | 2,56 | 2,944 | 25/06/2013 | 5,7 | 4,56 | 3,192 |
| 29/04/2013 | 1,4 | 1,12 | 1,288 | 26/06/2013 | 6,8 | 5,44 | 3,808 |
| 30/04/2013 | 0,7 | 0,56 | 0,644 | 27/06/2013 | 5,3 | 4,24 | 2,968 |
| 01/05/2013 | 2,9 | 2,32 | 2,668 | 28/06/2013 | 4,1 | 3,28 | 2,296 |
| 02/05/2013 | 2,2 | 1,76 | 2,024 | 29/06/2013 | 4,1 | 3,28 | 2,296 |
| | | | | 30/06/2013 | 4,1 | 3,28 | 2,296 |

Source : AIT MESBAH, 2013

Annexe D : Valeurs des paramètres climatiques mesurés sous serre par l'hygromètre

| Date | Tmn, °C | Tmx, °C | Tmoy, °C | Hmn, % | Hmx, % | Hmoy, % | TRmn, °C | TRmx, °C | TRmoy, °C |
|------------|---------|---------|----------|--------|--------|---------|----------|----------|-----------|
| 24/03/2013 | 10,6 | 25,5 | 15,7 | 55,9 | 86,2 | 75,1 | 8,3 | 16,0 | 11,0 |
| 25/03/2013 | 12,7 | 46,6 | 23,7 | 26,9 | 82,6 | 58,9 | 8,8 | 23,0 | 13,5 |
| 26/03/2013 | 13,3 | 20,5 | 15,9 | 62,0 | 82,6 | 72,5 | 8,9 | 12,9 | 10,8 |
| 27/03/2013 | 14,6 | 54,0 | 26,7 | 24,0 | 83,5 | 62,0 | 11,7 | 27,1 | 16,9 |
| 28/03/2013 | 14,0 | 46,1 | 23,9 | 22,8 | 87,9 | 66,8 | 11,4 | 24,5 | 15,7 |
| 29/03/2013 | 12,4 | 52,1 | 27,0 | 23,9 | 86,6 | 61,6 | 10,2 | 25,5 | 16,7 |
| 30/03/2013 | 13,1 | 40,9 | 23,5 | 41,4 | 87,3 | 65,9 | 11,0 | 25,1 | 15,9 |
| 31/03/2013 | 12,3 | 46,9 | 23,5 | 31,3 | 89,1 | 70,8 | 10,5 | 27,3 | 16,4 |
| 01/04/2013 | 12,5 | 33,1 | 20,4 | 37,6 | 90,6 | 68,3 | 8,7 | 17,4 | 13,6 |
| 02/04/2013 | 11,0 | 43,0 | 23,0 | 25,8 | 89,3 | 63,8 | 8,6 | 20,8 | 13,5 |
| 03/04/2013 | 9,6 | 46,3 | 26,0 | 18,4 | 87,5 | 60,0 | 7,6 | 28,9 | 14,8 |
| 04/04/2013 | 11,9 | 32,2 | 19,1 | 44,0 | 86,8 | 69,9 | 9,7 | 18,3 | 13,0 |
| 05/04/2013 | 11,2 | 48,0 | 25,3 | 25,8 | 87,6 | 63,3 | 9,2 | 24,5 | 16,0 |
| 06/04/2013 | 8,4 | 37,4 | 20,1 | 35,5 | 84,6 | 65,6 | 5,6 | 19,5 | 12,3 |
| 07/04/2013 | 7,4 | 44,4 | 22,0 | 22,6 | 88,5 | 63,1 | 5,4 | 21,8 | 12,2 |
| 08/04/2013 | 9,5 | 44,7 | 23,9 | 21,0 | 87,1 | 65,8 | 7,4 | 22,7 | 14,7 |
| 09/04/2013 | 13,3 | 38,7 | 22,9 | 33,7 | 88,5 | 67,4 | 11,3 | 19,8 | 15,3 |
| 10/04/2013 | 13,6 | 46,9 | 26,1 | 21,5 | 87,7 | 62,8 | 11,5 | 22,7 | 16,1 |
| 11/04/2013 | 12,5 | 42,2 | 24,5 | 29,7 | 87,6 | 61,0 | 10,5 | 21,0 | 14,9 |
| 12/04/2013 | 13,7 | 39,3 | 23,5 | 33,3 | 88,7 | 66,9 | 11,3 | 20,1 | 15,8 |
| 13/04/2013 | 16,0 | 40,3 | 22,7 | 38,8 | 89,0 | 72,2 | 12,8 | 23,5 | 16,5 |
| 14/04/2013 | 15,1 | 47,5 | 25,3 | 28,1 | 91,1 | 67,5 | 13,6 | 24,4 | 17,2 |
| 15/04/2013 | 16,5 | 30,6 | 21,7 | 45,8 | 90,7 | 73,5 | 14,9 | 18,1 | 16,2 |
| 16/04/2013 | 14,4 | 36,8 | 22,0 | 42,2 | 89,7 | 72,7 | 11,8 | 21,8 | 16,1 |
| 17/04/2013 | 16,4 | 40,3 | 24,8 | 34,9 | 87,6 | 68,9 | 14,3 | 21,9 | 17,4 |
| 18/04/2013 | 14,7 | 47,8 | 24,8 | 28,6 | 88,5 | 67,3 | 12,6 | 24,9 | 16,8 |
| 19/04/2013 | 16,1 | 42,3 | 25,2 | 31,6 | 91,2 | 66,9 | 14,2 | 21,9 | 17,2 |
| 20/04/2013 | 10,8 | 32,4 | 19,9 | 39,4 | 86,8 | 68,0 | 8,6 | 16,8 | 13,0 |
| 21/04/2013 | 10,3 | 43,0 | 21,8 | 27,6 | 88,7 | 63,5 | 7,9 | 20,3 | 12,9 |
| 22/04/2013 | 8,6 | 45,5 | 22,1 | 24,0 | 86,0 | 60,5 | 6,3 | 20,1 | 12,0 |
| 23/04/2013 | 9,1 | 44,6 | 22,2 | 20,7 | 85,7 | 61,6 | 6,8 | 18,9 | 12,4 |
| 24/04/2013 | 10,7 | 24,5 | 16,7 | 65,5 | 91,6 | 83,4 | 8,7 | 17,6 | 13,7 |
| 25/04/2013 | 13,8 | 42,6 | 24,7 | 30,6 | 92,6 | 62,8 | 11,7 | 21,6 | 15,5 |
| 26/04/2013 | 14,7 | 33,8 | 22,0 | 40,0 | 89,2 | 68,9 | 12,9 | 19,3 | 15,2 |
| 27/04/2013 | 13,9 | 45,7 | 25,2 | 22,2 | 88,8 | 62,1 | 12,0 | 22,1 | 15,5 |
| 28/04/2013 | 16,1 | 23,1 | 19,5 | 66,9 | 88,5 | 79,9 | 14,2 | 16,6 | 15,8 |
| 06/05/2013 | 13,4 | 19,3 | 15,6 | 65,6 | 87,1 | 77,2 | 10,5 | 12,7 | 11,5 |
| 07/05/2013 | 11,8 | 43,2 | 24,9 | 25,2 | 89,3 | 58,2 | 10,0 | 22,4 | 14,2 |
| 08/05/2013 | 14,7 | 48,8 | 27,7 | 18,1 | 82,8 | 53,4 | 11,8 | 18,4 | 15,2 |
| 09/05/2013 | 15,6 | 44,6 | 27,3 | 27,9 | 86,8 | 58,8 | 12,1 | 21,8 | 16,9 |
| 10/05/2013 | 14,3 | 45,6 | 26,8 | 21,9 | 88,4 | 62,8 | 11,8 | 20,0 | 17,1 |
| 11/05/2013 | 16,3 | 43,2 | 25,5 | 36,1 | 88,5 | 68,6 | 14,0 | 24,9 | 18,3 |
| 12/05/2013 | 15,2 | 43,2 | 25,9 | 31,0 | 89,7 | 64,1 | 12,7 | 22,7 | 17,0 |

| | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 13/05/2013 | 14,1 | 46,2 | 26,1 | 27,8 | 89,5 | 63,9 | 12,4 | 23,5 | 16,8 |
| 14/05/2013 | 16,1 | 33,7 | 23,5 | 44,3 | 90,9 | 71,7 | 14,0 | 20,1 | 17,4 |
| 15/05/2013 | 14,3 | 25,3 | 18,8 | 68,3 | 91,6 | 85,2 | 12,3 | 19,0 | 16,1 |
| 16/05/2013 | 14,7 | 35,9 | 24,5 | 35,1 | 86,6 | 61,8 | 12,4 | 18,0 | 15,3 |

Annexe E : Valeurs des paramètres climatiques mesurés en plein champ (ENSA)

| Date | TMin, °C | TMax, °C | TMean, °C | HRMin, % | HRMax % | HRMean, % | ETP externe mm |
|------------|-------------|-------------|--------------|-------------|------------|--------------|-------------------|
| 27/03/2013 | 10,0 | 26,0 | 18,0 | 60,0 | 90,0 | 75,0 | 4,2 |
| 28/03/2013 | 12,0 | 20,0 | 16,0 | 60,0 | 80,0 | 70,0 | 4,2 |
| 29/03/2013 | 12,7 | 17,5 | 15,1 | 70,0 | 90,0 | 80,0 | 3,9 |
| 30/03/2013 | 14,0 | 23,0 | 18,5 | 60,0 | 80,0 | 70,0 | 2,9 |
| 31/03/2013 | 15,0 | 24,0 | 19,5 | 65,0 | 85,0 | 75,0 | 3,9 |
| 01/04/2013 | 10,0 | 20,0 | 15,0 | 70,0 | 95,0 | 82,5 | 5,7 |
| 02/04/2013 | 9,0 | 19,0 | 14,0 | 70,0 | 80,0 | 75,0 | 4,7 |
| 03/04/2013 | 10,0 | 16,0 | 13,0 | 60,0 | 90,0 | 75,0 | 3,7 |
| 04/04/2013 | 11,0 | 21,0 | 16,0 | 60,0 | 80,0 | 70,0 | 4,7 |
| 05/04/2013 | 6,0 | 18,8 | 12,4 | 60,0 | 100,0 | 80,0 | 3,7 |
| 06/04/2013 | 10,0 | 25,0 | 17,5 | 60,0 | 90,0 | 75,0 | 3,7 |
| 07/04/2013 | 13,7 | 21,7 | 17,7 | 75,0 | 85,0 | 80,0 | 2,7 |
| 08/04/2013 | 10,0 | 14,0 | 12,0 | 62,0 | 87,0 | 74,5 | 3,7 |
| 09/04/2013 | 10,0 | 19,0 | 14,5 | 82,0 | 100,0 | 91,0 | 4,7 |
| 10/04/2013 | 9,0 | 18,0 | 13,5 | 60,0 | 100,0 | 80,0 | 3,7 |
| 11/04/2013 | 11,0 | 20,0 | 15,5 | 60,0 | 90,0 | 75,0 | 5,7 |
| 12/04/2013 | 10,0 | 19,0 | 14,5 | 65,0 | 95,0 | 80,0 | 3,7 |
| 13/04/2013 | 9,0 | 15,9 | 12,5 | 75,0 | 97,0 | 86,0 | 2,7 |
| 14/04/2013 | 12,0 | 22,0 | 17,0 | 50,0 | 90,0 | 70,0 | 3,7 |
| 15/04/2013 | 10,7 | 21,0 | 15,9 | 55,0 | 89,0 | 72,0 | 4,0 |
| 16/04/2013 | 10,0 | 20,0 | 15,0 | 60,0 | 95,0 | 77,5 | 3,0 |
| 17/04/2013 | 10,0 | 20,0 | 15,0 | 65,0 | 96,0 | 80,5 | 3,8 |
| 18/04/2013 | 9,0 | 20,0 | 14,5 | 60,0 | 97,0 | 78,5 | 6,3 |
| 19/04/2013 | 10,0 | 19,5 | 14,8 | 90,0 | 100,0 | 95,0 | 4,5 |
| 20/04/2013 | 9,9 | 19,0 | 14,5 | 72,0 | 100,0 | 86,0 | 3,5 |
| 21/04/2013 | 8,5 | 19,0 | 13,8 | 85,0 | 99,0 | 92,0 | 4,5 |
| 22/04/2013 | 11,6 | 20,0 | 15,8 | 75,0 | 97,0 | 86,0 | 4,7 |
| 23/04/2013 | 13,0 | 21,0 | 17,0 | 70,0 | 90,0 | 80,0 | 5,9 |
| 24/04/2013 | 14,0 | 22,0 | 18,0 | 60,0 | 92,0 | 76,0 | 3,9 |
| 25/04/2013 | 14,0 | 20,0 | 17,0 | 60,0 | 92,0 | 76,0 | 3,0 |
| 26/04/2013 | 13,0 | 22,2 | 17,6 | 74,0 | 94,0 | 84,0 | 4,9 |
| 27/04/2013 | 12,0 | 26,0 | 19,0 | 70,0 | 97,0 | 83,5 | 3,9 |
| 28/04/2013 | 13,5 | 21,5 | 17,5 | 76,0 | 97,0 | 86,5 | 4,9 |
| 29/04/2013 | 11,0 | 23,0 | 17,0 | 70,0 | 97,0 | 83,5 | 3,1 |
| 30/04/2013 | 14,7 | 27,0 | 20,9 | 65,0 | 98,0 | 81,5 | 2,4 |
| 01/05/2013 | 13,0 | 26,0 | 19,5 | 64,0 | 98,0 | 81,0 | 5,0 |
| 02/05/2013 | 13,0 | 22,0 | 17,5 | 80,0 | 99,0 | 89,5 | 4,3 |
| 03/05/2013 | 15,4 | 22,5 | 19,0 | 80,0 | 99,0 | 89,5 | 3,5 |
| 04/05/2013 | 11,4 | 16,7 | 14,1 | 49,0 | 95,0 | 72,0 | 2,5 |
| 05/05/2013 | 10,0 | 19,0 | 14,5 | 54,0 | 86,0 | 70,0 | 3,5 |
| 06/05/2013 | 7,5 | 23,5 | 15,5 | 34,0 | 87,0 | 60,5 | 4,4 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 07/05/2013 | 13,0 | 23,0 | 18,0 | 70,0 | 94,0 | 82,0 | 5,2 |
| 08/05/2013 | 11,5 | 24,0 | 17,8 | 49,0 | 95,0 | 72,0 | 5,9 |
| 09/05/2013 | 12,0 | 27,0 | 19,5 | 62,0 | 91,0 | 76,5 | 6,0 |
| 10/05/2013 | 15,0 | 24,5 | 19,8 | 64,0 | 90,0 | 77,0 | 5,1 |
| 11/05/2013 | 15,5 | 26,0 | 20,8 | 46,0 | 95,0 | 70,5 | 6,1 |
| 12/05/2013 | 16,1 | 25,0 | 20,6 | 63,0 | 94,0 | 78,5 | 5,1 |
| 13/05/2013 | 14,0 | 22,0 | 18,0 | 70,0 | 75,0 | 72,5 | 6,6 |
| 14/05/2013 | 10,0 | 20,0 | 15,0 | 70,0 | 97,0 | 83,5 | 5,8 |
| 15/05/2013 | 11,0 | 20,0 | 15,5 | 60,0 | 86,0 | 73,0 | 3,3 |
| 16/05/2013 | 12,0 | 23,0 | 17,5 | 50,0 | 94,0 | 72,0 | 4,5 |
| 17/05/2013 | 11,5 | 20,5 | 16,0 | 63,0 | 95,0 | 79,0 | 5,0 |
| 18/05/2013 | 10,0 | 23,8 | 16,9 | 50,0 | 94,0 | 72,0 | 4,0 |
| 19/05/2013 | 10,3 | 22,0 | 16,2 | 67,0 | 97,0 | 82,0 | 3,3 |
| 20/05/2013 | 11,7 | 23,6 | 17,7 | 45,0 | 92,0 | 68,5 | 5,1 |
| 21/05/2013 | 13,0 | 22,5 | 17,8 | 62,0 | 84,0 | 73,0 | 5,7 |
| 22/05/2013 | 14,0 | 22,0 | 18,0 | 75,0 | 94,0 | 84,5 | 2,9 |
| 23/05/2013 | 12,0 | 22,4 | 17,2 | 79,0 | 97,0 | 88,0 | 3,7 |
| 24/05/2013 | 13,0 | 25,0 | 19,0 | 40,0 | 97,0 | 68,5 | 5,2 |
| 25/05/2013 | 15,8 | 28,2 | 22,0 | 52,0 | 74,0 | 63,0 | 4,2 |
| 26/05/2013 | 15,3 | 25,5 | 20,4 | 53,0 | 90,0 | 71,5 | 5,5 |
| 27/05/2013 | 18,0 | 24,0 | 21,0 | 72,0 | 88,0 | 80,0 | 4,0 |
| 28/05/2013 | 19,0 | 25,5 | 22,3 | 60,0 | 80,0 | 70,0 | 5,1 |
| 29/05/2013 | 20,0 | 26,0 | 23,0 | 45,0 | 70,0 | 57,5 | 4,9 |
| 30/05/2013 | 19,7 | 26,5 | 23,1 | 50,0 | 85,0 | 67,5 | 6,2 |
| 31/05/2013 | 21,0 | 31,0 | 26,0 | 40,0 | 80,0 | 60,0 | 5,2 |
| 01/06/2013 | 18,0 | 32,0 | 25,0 | 50,0 | 75,0 | 62,5 | 5,8 |
| 02/06/2013 | 17,0 | 30,0 | 23,5 | 74,0 | 86,0 | 80,0 | 6,3 |
| 03/06/2013 | 18,5 | 28,0 | 23,3 | 52,0 | 90,0 | 71,0 | 6,8 |
| 04/06/2013 | 17,5 | 29,0 | 23,3 | 60,0 | 90,0 | 75,0 | 7,6 |
| 05/06/2013 | 18,0 | 30,0 | 24,0 | 50,0 | 90,0 | 70,0 | 5,0 |
| 06/06/2013 | 17,0 | 27,0 | 22,0 | 52,0 | 80,0 | 66,0 | 6,8 |
| 07/06/2013 | 19,5 | 29,5 | 24,5 | 72,0 | 92,0 | 82,0 | 5,4 |
| 08/06/2013 | 17,5 | 29,2 | 23,4 | 76,0 | 96,0 | 86,0 | 5,4 |
| 09/06/2013 | 18,0 | 29,6 | 23,8 | 62,0 | 94,0 | 78,0 | 4,4 |
| 10/06/2013 | 17,2 | 28,0 | 22,6 | 60,0 | 90,0 | 75,0 | 5,8 |
| 11/06/2013 | 15,7 | 27,0 | 21,4 | 40,0 | 89,0 | 64,5 | 6,0 |
| 12/06/2013 | 16,0 | 27,7 | 21,9 | 40,0 | 86,0 | 63,0 | 7,9 |
| 13/06/2013 | 16,0 | 24,0 | 20,0 | 66,0 | 84,0 | 75,0 | 6,7 |
| 14/06/2013 | 17,0 | 24,5 | 20,8 | 93,0 | 96,0 | 94,5 | 5,4 |
| 15/06/2013 | 19,0 | 25,4 | 22,2 | 70,0 | 96,0 | 83,0 | 6,4 |
| 16/06/2013 | 16,0 | 24,2 | 20,1 | 87,0 | 98,0 | 92,5 | 7,9 |
| 17/06/2013 | 17,0 | 25,0 | 21,0 | 75,0 | 97,0 | 86,0 | 6,7 |
| 18/06/2013 | 15,5 | 27,0 | 21,3 | 73,0 | 95,0 | 84,0 | 5,3 |
| 19/06/2013 | 16,0 | 24,0 | 20,0 | 56,0 | 91,0 | 73,5 | 6,3 |
| 20/06/2013 | 15,0 | 23,0 | 19,0 | 60,0 | 75,0 | 67,5 | 6,3 |
| 21/06/2013 | 14,0 | 24,0 | 19,0 | 60,0 | 80,0 | 70,0 | 6,3 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 22/06/2013 | 18,0 | 27,0 | 22,5 | 50,0 | 70,0 | 60,0 | 6,5 |
| 23/06/2013 | 20,0 | 29,0 | 24,5 | 50,0 | 75,0 | 62,5 | 7,3 |
| 24/06/2013 | 19,9 | 29,5 | 24,7 | 60,0 | 70,0 | 65,0 | 6,5 |

Annexe F : Valeurs des températures du couvert végétal (Tc) de la tomate

| Date | Tc ARSIT °C | Tc DI °C |
|------------|----------------|-------------|
| 01/04/2013 | 27,81 | 27,13 |
| 03/04/2013 | 35,44 | 35,19 |
| 04/04/2013 | 29,75 | 32,69 |
| 07/04/2013 | 31,69 | 30,69 |
| 08/04/2013 | 33,06 | 33,19 |
| 14/04/2013 | 22,19 | 18,31 |
| 15/04/2013 | 26,25 | 26,25 |
| 16/04/2013 | 36,00 | 35,63 |
| 17/04/2013 | 35,25 | 31,94 |
| 18/04/2013 | 38,00 | 36,56 |
| 22/04/2013 | 26,75 | 29,44 |
| 23/04/2013 | 36,06 | 36,31 |
| 24/04/2013 | 18,38 | 18,56 |
| 25/04/2013 | 36,94 | 38,38 |
| 28/04/2013 | 21,56 | 21,19 |
| 07/05/2013 | 30,50 | 30,50 |
| 08/05/2013 | 37,88 | 36,50 |
| 09/05/2013 | 37,94 | 38,94 |
| 12/05/2013 | 31,56 | 31,63 |
| 13/05/2013 | 31,81 | 34,38 |
| 14/05/2013 | 21,50 | 25,25 |
| 15/05/2013 | 26,31 | 25,50 |
| 16/05/2013 | 27,00 | 29,19 |

Annexe G : Valeur des tensions en eau du sol enregistrées

| Date | Moyenne journalière de la tension (10 cm) | | | Moyenne journalière de la tension (20 cm) | | |
|------------|---|---------------|---------------|---|---------------|---------------|
| | M 1P20 (cbar) | M 1P30 (cbar) | M 1P40 (cbar) | M 2P20 (cbar) | M 2P30 (cbar) | M 2P40 (cbar) |
| 24/03/2013 | 10,0 | 3,5 | 0,3 | 12,2 | 6,3 | 0,17 |
| 25/03/2013 | 10,1 | 2,8 | 0,8 | 12,3 | 6,5 | 0,17 |
| 26/03/2013 | 10,3 | 2,8 | 0,5 | 12,1 | 6,6 | 0,08 |
| 27/03/2013 | 10,3 | 3,3 | 0,3 | 12,1 | 6,4 | 0,17 |
| 28/03/2013 | 10,8 | 3,3 | 0,3 | 12,1 | 6,3 | 0,08 |
| 29/03/2013 | 11,6 | 4,3 | 0,3 | 12,3 | 6,2 | 0,25 |
| 30/03/2013 | 12,8 | 6,3 | 0,5 | 12,4 | 6,8 | 0,67 |
| 31/03/2013 | 13,8 | 7,9 | 1,7 | 13,2 | 7,0 | 1,42 |
| 01/04/2013 | 15,1 | 8,9 | 2,4 | 14,2 | 8,0 | 1,92 |
| 02/04/2013 | 16,4 | 9,5 | 2,3 | 14,8 | 8,1 | 1,58 |
| 03/04/2013 | 18,6 | 9,7 | 1,9 | 15,3 | 8,0 | 1,17 |
| 04/04/2013 | 20,8 | 9,7 | 1,9 | 16,2 | 7,9 | 1,25 |
| 05/04/2013 | 23,4 | 10,1 | 2,0 | 17,5 | 8,5 | 1,25 |
| 06/04/2013 | 26,5 | 10,2 | 1,8 | 18,3 | 8,3 | 1,00 |
| 07/04/2013 | 30,6 | 10,7 | 2,1 | 19,9 | 8,8 | 1,42 |
| 08/04/2013 | 35,5 | 11,3 | 2,3 | 21,2 | 8,9 | 1,58 |
| 09/04/2013 | 41,3 | 11,7 | 2,4 | 22,1 | 8,9 | 1,58 |
| 10/04/2013 | 45,7 | 12,3 | 2,6 | 23,0 | 8,8 | 1,60 |
| 11/04/2013 | 50,3 | 12,5 | 2,8 | 24,8 | 9,3 | 1,75 |
| 12/04/2013 | 55,2 | 13,1 | 3,1 | 27,8 | 9,6 | 2,00 |
| 13/04/2013 | 60,3 | 13,3 | 3,0 | 30,8 | 9,8 | 2,33 |
| 14/04/2013 | 64,1 | 13,8 | 3,3 | 34,1 | 10,3 | 2,25 |
| 15/04/2013 | 69,7 | 13,5 | 3,2 | 37,8 | 10,6 | 2,33 |
| 16/04/2013 | 71,8 | 13,2 | 2,9 | 40,3 | 10,8 | 2,42 |
| 17/04/2013 | 74,3 | 13,3 | 2,9 | 43,0 | 10,9 | 2,33 |
| 18/04/2013 | 77,1 | 13,3 | 3,0 | 44,9 | 11,0 | 2,33 |
| 19/04/2013 | 81,4 | 13,7 | 3,3 | 47,8 | 11,7 | 2,42 |
| 20/04/2013 | 87,4 | 13,7 | 3,1 | 52,1 | 12,1 | 2,42 |
| 21/04/2013 | 92,0 | 13,8 | 3,4 | 56,8 | 13,2 | 2,50 |
| 22/04/2013 | 96,8 | 14,4 | 3,5 | 61,4 | 14,4 | 2,33 |
| 23/04/2013 | 102,5 | 14,8 | 4,3 | 67,6 | 15,8 | 2,58 |
| 24/04/2013 | 109,9 | 14,5 | 4,1 | 75,2 | 15,3 | 3,00 |
| 25/04/2013 | 110,0 | 14,4 | 3,8 | 77,9 | 16,7 | 2,42 |
| 26/04/2013 | 113,0 | 14,8 | 4,1 | 81,1 | 17,9 | 2,75 |
| 27/04/2013 | 113,8 | 15,6 | 4,4 | 83,6 | 19,6 | 3,00 |
| 28/04/2013 | 119,3 | 16,2 | 4,5 | 88,3 | 19,7 | 3,83 |
| 29/04/2013 | 118,5 | 14,8 | 3,3 | 90,8 | 17,8 | 2,50 |
| 30/04/2013 | 117,8 | 14,5 | 3,0 | 93,5 | 18,3 | 2,25 |
| 01/05/2013 | 115,0 | 14,3 | 3,3 | 91,5 | 20,5 | 2,25 |
| 02/05/2013 | 112,0 | 13,3 | 2,8 | 90,8 | 18,5 | 2,25 |
| 03/05/2013 | 109,5 | 13,0 | 2,0 | 90,3 | 17,3 | 2,25 |
| 04/05/2013 | 106,0 | 13,0 | 2,5 | 90,3 | 16,8 | 2,00 |
| 05/05/2013 | 103,5 | 13,0 | 3,0 | 90,0 | 17,5 | 2,25 |
| 06/05/2013 | 100,5 | 12,5 | 2,5 | 87,5 | 19,0 | 2,00 |
| 07/05/2013 | 104,5 | 14,5 | 4,5 | 95,0 | 21,0 | 2,50 |
| 08/05/2013 | 108,3 | 15,3 | 4,8 | 97,8 | 22,5 | 3,00 |
| 09/05/2013 | 110,5 | 15,8 | 5,3 | 99,3 | 23,3 | 3,00 |

| | | | | | | |
|------------|-------|------|-----|-------|------|-------|
| 10/05/2013 | 113,5 | 16,0 | 5,3 | 102,3 | 24,8 | 2,25 |
| 11/05/2013 | 115,5 | 15,8 | 4,3 | 104,8 | 23,8 | 0,50 |
| 12/05/2013 | 115,5 | 16,0 | 4,8 | 107,0 | 23,8 | 1,00 |
| 13/05/2013 | 117,0 | 16,3 | 5,0 | 110,8 | 24,8 | 2,00 |
| 14/05/2013 | 118,8 | 16,0 | 4,8 | 113,5 | 24,0 | 3,00 |
| 15/05/2013 | 118,8 | 15,0 | 3,8 | 115,3 | 21,0 | 3,25 |
| 16/05/2013 | 115,5 | 14,5 | 3,0 | 116,8 | 20,0 | 3,00 |
| 17/05/2013 | 112,5 | 14,8 | 3,8 | 116,0 | 21,5 | 3,00 |
| 18/05/2013 | 113,3 | 15,3 | 4,8 | 117,3 | 23,0 | 3,50 |
| 19/05/2013 | 111,0 | 15,3 | 4,0 | 116,0 | 21,8 | 4,00 |
| 20/05/2013 | 111,0 | 16,0 | 5,0 | 117,0 | 24,3 | 4,25 |
| 21/05/2013 | 110,0 | 15,8 | 4,3 | 113,8 | 23,5 | 4,75 |
| 22/05/2013 | 109,8 | 14,3 | 2,0 | 115,0 | 20,3 | 3,50 |
| 23/05/2013 | 108,0 | 14,3 | 2,5 | 114,8 | 20,8 | 3,75 |
| 24/05/2013 | 105,0 | 15,0 | 2,8 | 111,0 | 22,5 | 4,25 |
| 25/05/2013 | 104,0 | 15,5 | 2,3 | 107,0 | 23,0 | 4,50 |
| 26/05/2013 | 104,0 | 15,5 | 2,5 | 107,0 | 22,0 | 4,50 |
| 27/05/2013 | 104,0 | 15,3 | 2,5 | 107,8 | 22,0 | 4,50 |
| 28/05/2013 | 102,8 | 15,5 | 2,5 | 106,8 | 22,0 | 4,75 |
| 29/05/2013 | 104,5 | 15,8 | 2,8 | 108,3 | 23,5 | 5,00 |
| 30/05/2013 | 107,3 | 16,0 | 2,8 | 110,8 | 23,0 | 5,00 |
| 31/05/2013 | 110,3 | 16,0 | 3,3 | 115,0 | 24,0 | 5,25 |
| 01/06/2013 | 112,0 | 17,0 | 3,8 | 115,8 | 25,3 | 5,50 |
| 02/06/2013 | 114,0 | 17,3 | 3,8 | 116,3 | 26,0 | 5,75 |
| 03/06/2013 | 116,8 | 17,5 | 4,3 | 118,5 | 27,0 | 6,00 |
| 04/06/2013 | 118,0 | 17,5 | 4,5 | 119,0 | 27,5 | 6,25 |
| 05/06/2013 | 120,0 | 17,8 | 5,0 | 121,5 | 28,8 | 6,50 |
| 06/06/2013 | 121,3 | 17,3 | 4,8 | 121,0 | 27,8 | 6,75 |
| 07/06/2013 | 120,8 | 17,0 | 4,3 | 121,3 | 27,3 | 6,50 |
| 08/06/2013 | 120,0 | 17,0 | 4,0 | 120,3 | 27,3 | 6,50 |
| 09/06/2013 | 118,0 | 16,5 | 3,8 | 118,0 | 26,8 | 6,50 |
| 10/06/2013 | 119,3 | 17,3 | 4,5 | 122,0 | 29,0 | 7,00 |
| 11/06/2013 | 118,8 | 17,8 | 5,0 | 121,8 | 29,8 | 7,25 |
| 12/06/2013 | 118,0 | 18,0 | 5,0 | 120,0 | 29,8 | 7,50 |
| 13/06/2013 | 117,3 | 18,0 | 5,3 | 118,3 | 30,3 | 7,75 |
| 14/06/2013 | 117,0 | 18,5 | 5,8 | 117,8 | 30,5 | 8,00 |
| 15/06/2013 | 117,0 | 19,3 | 6,8 | 116,5 | 31,0 | 9,00 |
| 16/06/2013 | 116,0 | 20,5 | 7,5 | 115,8 | 31,5 | 10,50 |
| 17/06/2013 | 118,0 | 22,5 | 8,5 | 118,5 | 33,0 | 12,25 |
| 18/06/2013 | 119,0 | 23,8 | 8,8 | 119,0 | 34,0 | 14,00 |
| 19/06/2013 | 119,5 | 24,5 | 8,5 | 121,0 | 35,0 | 14,50 |

Annexe H : Valeurs des teneurs en eau du sol mesurées

| Date | Profondeur cm | Distance radiale, cm | | | | |
|------------|------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | -40 | -20 | 0 | 20 | 40 |
| | | Θ_w , % | Θ_w , % | Θ_w , % | Θ_w , % | Θ_w , % |
| 08/04/2013 | 10 | | | 4,65 | | |
| | 20 | | | 6,24 | | |
| | 30 | | | 9,87 | | |
| | 40 | | | 17,89 | | |
| 17/04/2013 | 10 | 16,1799672 | 15,2601779 | 13,8614377 | 17,31169 | 20,2290498 |
| | 20 | 20,5676965 | 19,1500808 | 16,237002 | 23,031923 | 23,5499546 |
| | 30 | 22,7389607 | 23,786937 | 20,6679941 | 27,7993678 | 25,5883039 |
| | 40 | 26,6001685 | 28,1379452 | 22,8230128 | 31,6571749 | 31,2851528 |
| 28/04/2013 | 10 | 16,5580887 | 17,1196716 | 14,5223507 | 17,3302652 | 16,6984844 |
| | 20 | 19,6534938 | 20,9858003 | 17,5218033 | 21,8917688 | 21,8917688 |
| | 30 | 24,4390057 | 25,8656452 | 24,6745182 | 26,5811937 | 25,8781502 |
| | 40 | 29,8958265 | 29,4751225 | 26,696427 | 29,1233047 | 29,1161361 |
| 08/05/2013 | 10 | 15,364725 | 16,1369015 | 14,3117571 | 15,7157143 | 14,87334 |
| | 20 | 21,2522616 | 23,0109063 | 18,3211872 | 22,3181069 | 23,8102902 |
| | 30 | 24,4700413 | 25,5376818 | 25,0578371 | 28,2604393 | 27,3371721 |
| | 40 | 29,1898781 | 27,6206432 | 29,6369463 | 29,8375778 | 29,677446 |
| 19/05/2013 | 10 | 15,9965058 | 16,2070994 | 14,8031421 | 17,4706609 | 16,9792758 |
| | 20 | 17,4152187 | 18,6409408 | 15,3368205 | 19,2804479 | 19,5469092 |
| | 30 | 21,519313 | 21,1797322 | 21,6207677 | 25,3614402 | 23,5980466 |
| | 40 | 23,9823858 | 24,6541681 | 24,4852651 | 26,8356642 | 26,7081301 |
| 29/05/2013 | 10 | 15,9965058 | 16,0667036 | 15,7157143 | 17,0494737 | 16,2772972 |
| | 20 | 20,8259235 | 23,4372444 | 19,493617 | 23,1707831 | 21,5720152 |
| | 30 | 24,3155422 | 27,0288804 | 25,3003892 | 25,7864956 | 25,3723274 |
| | 40 | 24,9933415 | 30,2342536 | 27,5627303 | 30,1323969 | 28,3738786 |
| 09/06/2013 | 10 | 17,2600673 | 17,1196716 | 16,1369015 | 19,7871903 | 22,2441155 |
| | 20 | 21,0923848 | 23,8102902 | 19,9039674 | 26,1658082 | 25,4623504 |
| | 30 | 25,1548443 | 28,2143944 | 21,5677229 | 29,632128 | 27,4303551 |
| | 40 | 27,145811 | 31,0004385 | 26,8050559 | 31,1322973 | 28,8904844 |
| 19/06/2013 | 10 | 16,1369015 | 17,400463 | 16,5580887 | 17,6110566 | 16,4176929 |
| | 20 | 20,0798319 | 22,4246914 | 19,2271557 | 22,5312759 | 20,5594622 |
| | 30 | 25,3826465 | 26,0844533 | 26,4741084 | 27,5616358 | 25,0038958 |
| | 40 | 28,3107605 | 28,9155513 | 30,2016953 | 29,388049 | 28,1266336 |
| 30/06/2013 | 10 | 15,7859122 | 16,4176929 | 16,3474951 | 17,8918481 | 17,4706609 |
| | 20 | 20,2930009 | 19,7600783 | 18,9606943 | 21,1456771 | 20,5594622 |
| | 30 | 27,4401306 | 25,9335459 | 26,8668094 | 25,3697037 | 26,9128318 |
| | 40 | 28,3315461 | 28,0670902 | 28,6100615 | 28,9181797 | 29,4372131 |

Résumé

Résumé :

La sécurité alimentaire des pays et la durabilité de la production agricole dépendent de la conservation de la ressource en eau et la gestion de l'eau utilisée en irrigation. Cependant la majorité des techniques utilisées en irrigation actuellement sont des techniques de surface qui présentent beaucoup de pertes en raison de la mauvaise gestion de l'eau, percolation de l'eau en profondeur et l'évaporation de l'eau. Dans cette optique la recherche des nouvelles techniques d'irrigation plus économes en eau fait l'objet de notre étude. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet BMBF qui a pour objectif de tester la technique souterraine innovante ARSIT (irrigation technology by auto-regulative subsurface pipes) au niveau de la station expérimentale de l'ENSA sous serre sur la culture de la tomate. L'objectif principal de l'étude est de vérifier les résultats trouvés en laboratoire sur la technique ARSIT (autorégulation de l'humidité du sol et efficacité en irrigation élevée) dans des conditions naturelles. Les résultats obtenus par l'expérience ont permis de comprendre le fonctionnement autorégulant des conduites ARSIT à l'approvisionnement de l'eau au niveau des racines de la plante en fonction de l'humidité du sol. Dont la technique ARSIT a favorisé un sol moyennement humide et idéale pour la croissance de la tomate avec des tensions en eau du sol varient entre 91 et 441 Cmbar.

Mots clés : économie en eau, efficacité d'irrigation, irrigation souterraine, irrigation de surface, conduite autorégulante, humidité du sol, tension en eau du sol.

Summary:

Food security of countries and the durability of agricultural production depend on the conservation of water resources and management of the water used in irrigation. But most techniques currently used in irrigation are surface irrigation techniques, there has been a lot of surface loss due to, mismanagement of water; percolation of water in depth and water evaporation. In this context the research of new irrigation techniques of water-saving is the subject of our study. This study is part of the BMBF project that tests the subsurface irrigation technique ARSIT (irrigation technology by auto-regulative subsurface pipes) at the experimental station of the ENSA in the tomato cultivation greenhouse. The main objective of the study is to test the results found in the laboratory on ARSIT technique (autoregulation of soil humidity and high efficiency in irrigation) in natural conditions. The results of the

experiment are used to understand the self-regulating operation pipe (ARSIT) to the water supply at the root of the plant in terms of its application. Whose ARSIT technique favored a moderately humidity soil and ideal for the growth of tomato with soil water tensions varies between 91 and 441 Cmbar.

Keywords: water economy, irrigation efficiency, surface irrigation, subsurface irrigation, auto-regulative pipe, soil water contents, soil water tensions.

ملخص :

استمرارية الإنتاج الزراعي و الأمن الغذائي تعتمد على المحافظة على الموارد المائية و تسيير هذه الموارد المستعملة في الري. إلا أن معظم التقنيات المستعمل في الري في الوقت الحالي هي تقنيات سطح التي تؤدي إلى ضياع كميات كبيرة من الماء عن طريق سوء التسيير, تبخر المياه و تسربها إلى جوف الأرض. و في هذا الصدد الهدف من دراستنا هو البحث عن تقنيات جديدة تساهم على تسيير الموارد المائية المستعملة في الري بطرق اقتصادية و ناجعة. هذه الدراسة تدخل ضمن مشروع BMBF الذي يهدف إلى تجريب تقنية مستحدثة للسقي تحت سطح التربة بطريقة ذاتية التعديل (ARSIT) قنوات تعديل رطوبة التربة بالنسبة إلى احتياجاتها) على مستوى مزرعة التجارب البيوت البلاستيكية ENSA في زراعة الطماطم. الهدف الأساسي من الدراسة هو تجريب النتائج المتحصل عليها في المختبر الخاصة بهذه التقنية(تعديل رطوبة التربة و نجاعة السقي عاليا) في شروط طبيعية.النتائج المتحصل عليها كانت مهمة و سمحت لنا بفهم طريقة عمل التعديل الذاتي لقنوات السقي ARSIT. حيث أن التقنية منحت لتربة رطوبة معتدلة ومثالية لنمو الطماطم مع شد التربة للماء تتراوح بين 91 و 441 Cmbar.

كلمات المفاتيح : اقتصاد المياه, نجاعة السقي, الري السطحي, الري تحت سطح التربة, قنوات ذاتية التعديل, رطوبة التربة, شد التربة للماء.