



INSTITUT SUPÉRIEUR DES SCIENCES AGROPASTORALES  
DE LA HAVANE

*" Fructuoso Rodriguez Pérez "*

**INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES AGRICOLES**

**Nutrition et fertilisation de la  
tomate (*Lycopersicum esculentum*, Mill)  
en condition de fertigation goutte à goutte  
avec l'azote et le potassium sur  
un sol Ferrallitique rouge**

**Thèse pour l'obtention du grade scientifique de  
Docteur ès Sciences Agricoles**

**Auteur : Ingénieur Adolphe ADJANOHOUN**

**Directeur : Dr Joaquin A. Hernandez Borroto**

*La Havane, 1996*

# Table des matières

<b>RESUME</b>	<b>4</b>
<b>DEDICACE</b>	<b>5</b>
<b>REMERCIEMENT</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
<b>REVISION BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>10</b>
<b>Nutrition de la tomate</b>	<b>10</b>
Fonctions des éléments N, P et K	10
Accumulation de NPK par les plants de tomate	16
Extraction et exportation des nutriments par la culture de la tomate	17
Besoins en engrais des plantes de tomate	18
<b>Fertigation localisée</b>	<b>24</b>
Caractéristiques	24
Avantages	25
Inconvénients	27
Uniformité de la distribution	27
Propriétés fondamentales des engrais à utiliser dans la fertigation localisée	30
<b>MATERIELS ET METHODES</b>	<b>36</b>
<b>Conditions expérimentales générales</b>	<b>36</b>
<b>Description des essais et expérimentations au champ</b>	<b>39</b>
Essai 1 : ‘‘Etude du comportement de la tomate variété Floradel sous fertigation goutte à goutte et sous irrigation par aspersion’’	39
Essai 2 : ‘‘Etude du comportement de la tomate variété Campbell-28 sous fertigation azotée sur un substrat sol-matière organique en bacs’’	40
Essai 3 : ‘‘Etude de la réponse de la tomate variété Campbell-28 à des doses croissantes de potassium sur zéolite en bacs’’	40
Expérimentation 1: ‘‘Etude de la réponse de la tomate variété Campbell-28 à sous différentes techniques d’irrigation et fertilisation sur un sol Ferrallitique Rouge’’	40
Expérimentation 2 : « Réponse de la tomate variété Campbell-28 à des doses croissantes d’azote sous fertigation goutte à goutte sur un sol Ferrallitique Rouge »	41
Expérimentation 3 : ‘‘Etude de l’effet des combinaisons azote-potassium sur la culture de la tomate variété Campbell-28 sur un sol Ferrallitique Rouge sous fertigation goutte à goutte’’	41
<b>Evaluations faites</b>	<b>42</b>
Croissance et état nutritionnel des plantes	42
Rendement et qualité interne des fruits	42

Teneurs et extractions de nutriments	43
Mobilité des éléments N-P-K dans le sol	43
<b>Méthodes d'analyses utilisées</b>	<b>43</b>
Sols	43
Plantes	44
<b>Analyses statistiques</b>	<b>45</b>
<b>Evaluation économiques</b>	<b>45</b>
<b>RESULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>46</b>
<b>Comparaison du comportement de la tomate variété Floradel et Campbell-28 sous différentes techniques d'irrigation et de fertilisation</b>	<b>46</b>
Essai 1 : « Etude du comportement de la tomate variété Floradel sous la fertigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion en conditions semi-contrôlées »	46
Expérimentation 1 : « Etude du comportement de la tomate variété Campbell-28 sous différentes techniques d'irrigation et de fertilisation en plein champ »	47
<b>Effet de doses croissantes d'azote</b>	<b>69</b>
Essai 2 'Etude du comportement de la tomate variété Campbell-28 sous fertigation azotée sur un substrat sol-matière organique en cannaux''	69
Expérimentation 2 : ' Réponse de la tomate variété campbell- 28 à des doses croissantes d'azote sous fertigation goutte à goutte dans un sol ferrallitique rouge''	73
<b>Effet de doses croissantes de potassium</b>	<b>84</b>
Essai 3 : 'Etude de la réponse de la tomate variété Campbell- 28 à l'application de doses croissantes de potassium sur substrat de zéolite en condition de canneaux''	84
<b>Effet des interactions azote-potassium sur la croissance et le développement de la tomate variété Campbell-28</b>	<b>88</b>
Expérimentation 3 : 'Etude de l'effet de la combinaison azote-potassium sur la culture de la tomate variété Campbell-28 sur un sol Ferrallitique rouge sous fertigation goutte à goutte	88
<b>Evaluation financière</b>	<b>96</b>
Evaluation financière comparative de l'utilisation des différentes techniques	96
Evaluation financière des différentes combinaisons N-K	97
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>99</b>
<b>RECOMMANDATIONS</b>	<b>101</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>102</b>

## Résumé

Au cours de la période de 1993 à 1996, trois essais sur des planches et bacs en ciment puis trois expériences en champs ont été conduits. L'objectif de ces études a été de déterminer la faisabilité agro-économique de la culture de la tomate en condition de fertigation goutte à goutte avec l'azote et le potassium ainsi que les doses d'azote et de potassium les plus adéquates sur un sol Ferrallitique rouge.

Les plantes cultivées en condition de fertigation goutte à goutte ont présenté la meilleure croissance végétative alors que les rendements ont connu une augmentation de plus de 60% en comparaison avec les plantes cultivées en condition d'irrigation par aspersion et application manuelle d'engrais, méthode actuellement en usage dans l'agriculture cubaine. Les teneurs totales en azote minéral et potassium de même que le coefficient d'utilisation et l'efficacité agronomique des éléments N, P et K, les plus élevés ont été obtenus en condition de fertigation goutte à goutte.

De fortes interactions azote – potassium sur le rendement de la tomate ont été enregistrées. Ainsi, la zone délimitée par les combinaisons de 160 à 180 kg/ha d'azote avec de 75 à 100 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O a été celle de meilleurs comportements. Dans cet intervalle, la combinaison de 163 kg/ha d'azote avec 98.7 kg.ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O a permis d'obtenir le rendement le plus élevé (46.19 t/ha).

L'analyse des échantillons de feuilles pris 75 jours après le semis s'est révélée comme étant un outil utile pour connaître l'état nutritionnel de cette culture au moment où des corrections de la fertigation sont encore possibles. L'utilisation de la fertigation goutte à goutte est faisable aussi bien du point de vue agronomique qu'économique en conditions de sols Ferrallitiques rouges.

## Dédicaces

- A ma famille
- A son Excellence Monsieur Hubert Sylvestre DEGUENON, Ambassadeur de la République du Bénin près la République de Cuba
- A mon Directeur de thèse, Dr Joaquin A. Hernandez Borroto
- A tous ceux qui voient leur souhait se réaliser

## Remerciements

- ✦ A l'Institut National des Sciences Agricoles (INCA) et à son Conseil Scientifique
- ✦ Au Département d'Engrais Biologiques et de Nutrition des Plantes ainsi qu'à sa Commission Scientifique
- ✦ A son Excellence Monsieur l'Ambassadeur de la République du Bénin près la République de Cuba et son épouse
- ✦ A Messieurs Raul HERNANDEZ, Roberto GONZALEZ, Omelio BORROTO, Anadelio GONZALEZ et Raphaël JOA.
- ✦ A mon Directeur de thèse, Dr Joaquin A. HERNANDEZ pour les renseignements et sollicitude constants durant sept années
- ✦ A Julio D. CALVO pour sa fraternité, son appui décisif et indispensable pour la réalisation du présent travail.
- ✦ A Yohima CHATERLAN pour son amour, sa préoccupation et son soutien
- ✦ A Osvaldo PEREZ et sa famille pour leur amitié sincère et profonde qui, à maintes occasions, a été décisive pour la réalisation du présent travail
- ✦ Aux docteurs Concepcia HEREDIA, Victor M. PANEQUE, Ramon BRUNET et Nicolas MEDINA pour la lecture et la correction du présent travail
- ✦ A Maria LEON, Gloria SAAVEDRA et Reynaldo REY, ainsi qu'à tout le personnel de l'Institut de Recherche sur l'Irrigation et le Drainage (IIRD) pour leurs orientations et appui
- ✦ A Xiomara VEITIA et sa famille
- ✦ A Lucila CORREA
- ✦ A Lazare Lin HOUNDANOU, Michel AVOCE, Jean-Pierre MUKANDAMA, Aminata MAIGA, Evariste GOUNOU, Elizabeth GUERRERO ; Timothée KITI et Yuri
- ✦ A Elena BEITRA, Sista WONG et tout le personnel du Département de l'Information Scientifique de l'INCA
- ✦ A tous les travailleurs de l'INCA, parmi lesquels je me suis senti à l'aise durant tout ce temps, en particulier à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la finalisation de ma thèse.

## Introduction

Au Bénin, l'agriculture représente le secteur déterminant de l'économie nationale du fait qu'elle emploie 70% de la population active et apporte 40% du produit intérieur brut (PIB) (Ministère du Développement Rural, 1995). Elle constitue, par conséquent, la base de toute stratégie de développement.

La tomate représente la principale culture maraîchère. Elle est partie intégrante de la majorité des mets dans les différentes régions du pays. Cependant, seul 1,93% de la superficie agricole totale a été emblavée par cette culture avec un rendement moyen de 5,5 t/ha (FAO, 1995).

La production cubaine de tomate se situe par contre, autour de 331 000 tonnes avec un rendement moyen de 10,02 t/ha. Ces données situent Cuba au 25<sup>ème</sup> rang quant à la superficie cultivée, au 33<sup>ème</sup> rang pour la production totale et au 94<sup>ème</sup> rang pour le rendement par unité de superficie au niveau mondial selon la FAO (1993).

Les rendements antérieurs sont bas en comparaison avec ceux obtenus dans les pays développés. Ceci est dû à plusieurs facteurs parmi lesquels l'utilisation de technologies rudimentaires de production (Villareal, 1978). L'immense majorité des sols du Bénin présentent de faibles capacités d'échange cationique (Cline et Buol, 1973). Woff et Drosdoff (1979), ont reporté que ces sols possèdent une perméabilité relativement élevée avec une faible capacité de rétention d'eau. Ces propriétés indiquent la nécessité de l'irrigation et surtout une gestion spéciale de cette irrigation ainsi que la fertilisation en conditions de productions intensives.

Les énormes et croissantes difficultés pour l'installation de l'irrigation des cultures (seul 0,69% de la totalité des terres arables est irrigué selon la FAO, 1995), dues aux limitations de l'accès à l'eau rendent chaque fois plus impérieuse la rationalisation de l'utilisation de l'eau pour satisfaire les besoins en aliments des populations.

La fertigation localisée apparaît comme un système capable de maintenir un niveau optimal aussi bien d'humidité que d'éléments nutritifs dans le sol pour un bon développement des cultures. Elle permet, en outre, de doser avec précision les apports d'engrais (Medina, 1981 et Amo *et al.*, 1991). Par ailleurs, la possibilité d'approvisionner, tous les jours, les plantes en eau et éléments nutritifs, constitue un grand avantage.

Les caractéristiques du système, précédemment décrites, constituent un immense avantage quant à la gestion de l'eau et des éléments nutritifs. C'est ce qui explique son impact sur l'agriculture mondiale au point de constituer un tournant historique dans de nombreuses régions où déjà on parle de l'agriculture avant et après l'introduction de la fertigation localisée selon la littérature.

Il est établi que l'efficacité de la fertilisation augmente avec l'irrigation car les engrais se dissolvent mieux, facilitant le mouvement des éléments nutritifs vers les racines des plantes. De façon réciproque, l'efficacité de l'irrigation croît avec la fertilisation du fait que le volume d'eau nécessaire par unité de matière sèche est réduit. Ceci s'explique par le fait que les besoins nutritionnels des plantes sont couverts (El- Sayed et Ludders, 1984 et Amo *et al.*, 1991).

Les concentrations les plus élevées et les plus constantes obtenues du fait de la localisation de la quantité totale d'engrais aux abords immédiats des racines actives des plantes (Bakker, Slangen et Glas, 1984), la haute humidité permanente du sol qui favorise les conditions de dissociations ioniques et les activités constantes (Halevy, 1979), sont les deux facteurs déterminants de l'augmentation de l'efficacité dans l'utilisation combinée de l'eau et des engrais (Medina, 1981).

Legaz et De Barreda (1981) ; Bakker, Slangen et Glas (1984) puis Serrano (1987), ont indiqué que l'augmentation de l'efficacité de l'usage aussi bien de l'eau que des engrais permet des bénéfices d'engrais et d'eau de l'ordre de 20 à 30% voire plus.

Bar Yosef et Sagiv (1982) ont rapporté un accroissement de 66% dans les rendements de tomate avec l'utilisation de la fertigation localisée par rapport à l'irrigation par aspersion avec épandage d'engrais. Quant à Singh, Singh et Bhangari (1989), ils ont rapporté qu'en Floride (Etat-Unis d'Amérique), l'utilisation combinée de l'eau et des engrais pour la culture de la tomate a permis de doubler les rendements. Ces mêmes auteurs ont indiqué que cette technique a été plus productive car elle a permis une réduction du coût unitaire de la production en même temps qu'elle accroît la compatibilité environnementale. Plus récemment, des auteurs comme Nwadukwe et Chude (1995) puis Nilsson et Wiklund (1995), ont mis en exergue les profits tant agronomiques qu'économiques que cette technique permet d'obtenir.

L'introduction de la fertigation localisée dans la culture de la tomate amène à connaître le comportement des plantes (croissance, développement et rendement). De même, il est nécessaire de préciser la nutrition des plantes et la rentabilité financière du système



dans les conditions tropicales. Tenant compte de ce qui précède, il a été décidé de mener la présente étude qui revêt une importance pour le Bénin et Cuba.

Les objectifs poursuivis par ce travail sont :

1. Déterminer la faisabilité agro-économique de la culture de la tomate sous fertigation goutte à goutte dans les conditions d'un sol Ferrallitique rouge
2. Déterminer les doses de N et K adéquates pour la tomate cultivée avec cette technique dans les conditions décrites antérieurement
3. Connaître le comportement de la nutrition, la croissance et le développement de la tomate cultivée sous fertigation et déterminer l'utilité de l'analyse foliaire pour son contrôle.

# Révision bibliographique

## *Nutrition de la tomate*

### Fonctions des éléments N, P et K

#### Azote

L'azote existe en abondance dans la nature sous deux états.

- Etat libre : il constitue les 4/5 de l'atmosphère. Cet azote inerte dissout l'oxygène que nous respirons. Seules certaines bactéries s'en alimentent. Il n'est utilisable directement ni par les animaux, ni par les végétaux.
- Etat combiné : il existe sous forme minérale ou organique. Sous la forme minérale, l'azote est l'aliment de base de la plante qui ne l'absorbe que sous cette forme. Sous la forme organique, il fait partie de la matière vivante. La plante ne peut pas absorber directement l'azote organique. Cette forme est, par contre, la plus indiquée pour les animaux.

Le rôle que joue l'azote dans les phénomènes de la vie est fondamental. En effet, il se trouve dans le protoplasme de la cellule, combiné à d'autres composés fondamentaux pour former des substances organiques azotées que sont les albuminoïdes, les protéines et protides (Gros, 1966).

Wallace (1980), a rapporté que les composés azotés représentent de 40 à 50% de la matière sèche du protoplasme cellulaire. C'est ce qui justifie que, pour toutes les fonctions relatives à la croissance, l'azote est nécessaire en quantités relativement élevées. Ainsi, de nombreux composés organiques importants pour la plante comme la chlorophylle, les acides aminés, les amides et les alcaloïdes sont des composés azotés. Tout ceci amène à considérer l'azote comme le premier des éléments essentiels. Selon Gros (1966), l'azote exerce une action de choc. Une plantule contenant suffisamment de l'azote émerge rapidement, développe rapidement des feuilles et tiges et présente une couleur verte obscure du fait de la présence de la chlorophylle. Du fait que les processus de la photosynthèse ont lieu dans les parties vertes qui contiennent la chlorophylle, l'on peut dire que la production s'obtient dans les feuilles. Une bonne végétation fait prédire une intense activité assimilatrice, c'est-à-dire une croissance active et une récolte abondante. C'est ce qui justifie que l'azote soit considéré comme le facteur déterminant du rendement.

La plante absorbe l'azote sous forme minérale par ses racines. Cette forme minérale peut être nitrique ou ammoniacale. Pour simplifier, on dit souvent que la plante absorbe l'azote sous forme nitrique. Ceci n'est pas absolument exact car la forme ammoniacale peut être absorbée par la plante lorsque la nitrification n'a pas lieu dans le sol.

L'azote induit une augmentation de la capacité d'échange cationique des racines des plantes et, partant, l'absorption d'autres éléments nutritifs (Sussai, Krishnamoorth et Loganathan, 1975). Selon Dinchev (1972), la division cellulaire est négativement affectée par la déficience d'azote aux points de croissance ou dans les tissus embryonnaires des plantes. Les conséquences directes de telles affectations résident dans la réduction de la taille et de la grosseur desdites plantes, de l'aire foliaire et, par conséquent, du rendement. Ceci se justifie par le fait que la division cellulaire est une condition nécessaire et indispensable pour la croissance et le développement des plantes.

Adams, Winsor et Donald (1973), ont indiqué que la déficience d'azote a des effets néfastes sur la floraison et la fructification de la tomate. L'augmentation de la masse des plantes, la longueur des différents organes ainsi que le nombre de régimes floraux et de fleurs par plants sont également affectés. Ces mêmes auteurs signalent l'effet négatif de la déficience d'azote sur le nombre de fruits par plant et la masse moyenne de ces fruits.

Quant aux résultats de Luh, Ukai et Chung (1973), il ressort que la teneur en solides solubles totaux des fruits de tomate diminue de plus de 8% lorsque le niveau d'azote n'est pas adéquat.

D'après de nombreux auteurs, l'excès d'azote dans les plantes de tomate induit un développement végétatif exubérant avec moins d'organes reproductifs. Uxecull (1979), par exemple, affirme que l'excès de cet élément provoque la diminution de la taille des fruits et l'atténuation de leur coloration.

Rajagopal et Rao (1974), ont montré que les plantes de tomate avec des déficiences en azote présentent de faibles teneurs en hormones de croissance (auxines, gibbérellines).

Autre effet de la déficience en azote chez la tomate est la présentation de bourgeons nains, effilés et rigides avec de petites feuilles de couleur vert pâle et une pigmentation jaune ou violette. Les feuilles les plus vieilles tombent prématurément.

La déficience en azote chez la tomate provoque aussi la perte des fleurs, notamment lorsque les températures sont élevées (Abdalla et Verkerk, 1970). Dans ce sens,

Fundoro, Arzola et Machado (1983), ont suggéré la possibilité d'obtenir des récoltes maximales avec l'apport des quantités d'azote inférieures à celles qui sont nécessaires au développement végétatif des plantes. En effet, il est possible de déterminer le niveau d'azote adéquat pour l'obtention d'un rapport fruit/partie végétale optimal.

Fisher (1981), a obtenu des rendements de tomate élevés sur le premier régime avec des doses d'azote élevées. Quant à Uzo (1970), Bogomolova (1976) et Fawusi (1977), ils affirment que l'application de quantités élevées d'azote provoque une maturité tardive des fruits.

Gros (1966), a signalé qu'un excès d'azote provoque un retard dans la maturation du fait de la croissance continue des plantes. D'après Saxena, Locascio et Lucas (1975) et Uexcull (1979), l'excès d'azote diminue la résistance des plantes de tomate à de nombreuses maladies. Cet excès d'azote tend à diminuer la teneur des solides totaux dans le jus (Garrison, Taylor et Drinkwater, 1967 ; Aliev, 1980).

De Geus (1967), rapporte que du point de vue nutritionnel, la tomate ne présente pas une "préférence" pour l'un ou l'autre des ions nitrates et ammonium. Cependant, Kdrev et Gengeva (1978) et Carpena, Zornoza et Carpena (1983), signalent que le type d'ion influe sur l'interaction cationique pendant l'assimilation. La forme de l'azote administrée à la plante de tomate exerce un effet notable sur l'absorption et l'utilisation des autres ions. En effet, les concentrations élevées d'ammonium provoquent une diminution de l'absorption du calcium et du magnésium. Les plantes qui ont reçu une proportion de 60% de nitrate et 40% d'ammonium ont présenté une croissance similaire à celle des plantes ayant reçu toute la quantité d'azote sous forme de nitrate. Le nitrate peut être "préféré" à l'ammonium dans maints cas, selon Kirby et Mengel (1967) ; mais Segull, Dow et Geraldson (1977), ont rapporté cet anion bien que permettant d'augmenter les rendements, favorise aussi une plus grande incidence des pourritures.

## **Phosphore**

Le phosphore est un composant essentiel des végétaux. On le retrouve combiné à d'autres substances formant des phosphates minéraux et organiques tels que les lectines, les nucléoprotéides, et autres.

Le phosphore est abondant notamment dans les organes jeunes. Il s'accumule dans les graines sous forme de substance de réserve. Il est absorbé par les plantes surtout pendant la période de croissance active. A la fin de la végétation, on observe un transfert des phosphates vers les organes de réserve de la plante. Ce phénomène est caractéristique de la maturation (Gros, 1966).

L'auteur sus-cité rapporte que le phosphore participe de façon intime dans les activités fonctionnelles de la plante. En effet, sans la présence du phosphore, les sucres nécessaires à la synthèse des protéines ne pourraient être transportés et les transformations nécessaires ne pourraient se faire pour faute d'énergie. Le phosphore joue donc un double rôle : un rôle de transport et un autre moteur.

Par ailleurs, cet élément favorise le développement du système racinaire au début de la végétation. Il se présente aussi comme un facteur de précocité contrairement à l'azote qui tend à prolonger la végétation. Ceci explique le fait que l'apport de  $P_2O_5$  peut rapprocher de quelques jours la maturation des fruits. Le phosphore est un régulateur car favorisant tous les phénomènes liés à la fécondation et la fructification puis la maturation de tous les organes végétatifs.

Wallace (1980), rapporte que le phosphore est étroitement lié à plusieurs processus vitaux de croissance de la plante. Il est, en effet, un composant des acides nucléiques. Il intervient dans plusieurs réactions biochimiques relatives au métabolisme des hydrates de carbone, lipides et protéines. Dans ces réactions, il joue le rôle d'intermédiaire donnant ou acceptant de l'énergie.

Le phosphore est très important pour la germination des graines, le métabolisme des plantules et le développement des racines. Il joue un rôle important dans la régulation entre les organes végétatifs et reproducteurs (Guenkov, 1969) puis il est nécessaire pour obtenir des récoltes précoces (De Geus, 1967 ; Hipp, 1970).

Selon Besford (1979), les plantes de tomate déficientes en phosphore présentent des bourgeons chétifs, avec de petites feuilles de couleur opaque ; les folioles se courbent vers l'arrière et les feuilles les plus vieilles tombent. Les plantes déficientes en phosphore présentent également une réduction prononcée de la teneur en protéines

solubles dans les feuilles puis, par contre, une accumulation notoire des fractions d'acides aminés et de polypeptides.

Menary (1967) et Menary et Van Staden (1976), ont montré que lorsque les plantes de tomate sont soumises à un stress de phosphore avant la floraison, le nombre de fleurs qui arrivent à l'anthèse au niveau du premier régime est réduit. Ceci est lié à une diminution de l'activité de la citoquinine de l'exudation racinaire.

## **Potassium**

D'après Gros (1966), les cendres des végétaux contiennent une grande proportion de potassium (25 à 50 %). Dans le végétal, le potassium est rencontré surtout sous forme de sels de divers acides minéraux et organiques. Il joue l'important rôle de régulateur des fonctions des organes de la plante notamment dans les feuilles les plus jeunes. C'est d'ailleurs ce qui explique sa grande concentration de ces feuilles.

Le potassium intervient aussi dans l'assimilation chlorophyllienne. Il favorise la synthèse des glucides dans les feuilles ainsi que le transfert et l'accumulation de ces glucides dans les organes de réserve. Il permet de réduire la transpiration de la plante ; ce qui génère des économies en eau. Au même moment, cet élément augmente la résistance de la plante à la sécheresse. Il est, par conséquent, un élément d'équilibre et de maintien de la santé des plantes.

Contrairement aux autres éléments essentiels, le potassium n'entre pas dans la composition organique des végétaux. Cependant, il est présent dans tous les organes dans des proportions élevées. Presque la totalité du potassium de la plante se trouve sous forme soluble avec une grande partie dans le jus cellulaire et le cytoplasme.

Le potassium possède une grande mobilité dans les tissus. Ceci explique la rapidité avec laquelle il est réutilisé par les tissus jeunes au besoin.

Les principales fonctions et processus dans lesquels il intervient sont la synthèse des hydrates de carbone et protéines, la régulation des conditions hydriques au sein des cellules et la perte d'eau par transpiration. Il joue aussi le rôle de catalyseur dans les réactions enzymatiques (Wallace, 1980).

Besford y Haw (1975), ont reporté que le potassium favorise l'augmentation de la taille des fruits de tomate. Kiroly (1976) puis Picha et Hull (1980), affirment que cet élément joue un rôle dans la réduction des dommages causés par les virus.

De nombreux auteurs tels que Agui, Gomez et Recalde (1978), Ignatov (1978), considèrent que le potassium joue un rôle important dans le processus de pigmentation des fruits. Les plantes déficientes en potassium présentent une couleur obscure avec des espacements entre nœuds courts. Les feuilles sont, quant à elles, de couleur verte-bleutée avec les plus vieilles généralement grisâtres. Par ailleurs, les feuilles présentent un aspect brûlé avec les bordures enroulées vers le haut. Dans ces conditions, les fruits ne mûrissent pas de façon égale (Wallace, 1980 ; Uexcull, 1979).

D'après Uexcull (1979), une déficience légère de potassium affecte plus la taille et la qualité des fruits que leur nombre.

## **Accumulation de NPK par les plants de tomate**

Fernandez et al. (1975), après l'analyse des différents tissus du végétal tout au long de son cycle de vie, ont affirmé que les teneurs en éléments nutritifs les plus faibles se trouvent dans les racines. Jusqu'à la floraison, les teneurs en azote et potassium dans les feuilles ont été les plus élevées tandis qu'à la fin du cycle, les fruits avaient présenté les plus hautes teneurs en potassium dans les fruits.

Fawusi (1977), a distingué quatre périodes physiologiques importantes relatives à la nutrition des plantes de tomate sur la base des changements notoires qui s'opèrent au cours du cycle végétatif : la germination, la croissance végétative accélérée, la phase reproductive et la dégénérescence. Brunet, Valle et Acosta (1991), ont montré que la majeure partie de l'azote se trouve dans les feuilles et les fruits tandis que le phosphore présente une distribution plus équilibrée dans le végétal. Le potassium quant à lui se trouve dans les feuilles et les fruits. Dans les autres parties de la plante, on le retrouve en quantités non moins importantes.

D'après Greenwood et Barnes (1978) puis Greenwood et al. (1980), la teneur en éléments nutritifs en relation avec l'accroissement maximal de la plante diminue avec l'âge de cette dernière.

Greenwood et al. (1980) ajoutent que la variation des contenus en éléments nutritifs des divers organes des plantes de tomate est essentielle comme critère d'utilisation de l'analyse des tissus végétaux pour établir le diagnostic et pour estimer l'extraction de nutriments par les cultures comme indicateur des besoins nutritionnels de ces cultures. Sanchez (1982), rapporte que la majeure partie des teneurs en éléments NPK des plantes de tomate est décelée pendant la phase de fructification suivie de la phase de floraison ; ceci est valable aussi bien pour les tiges que les feuilles.

Selon Cardoza, Chailloux et Nunez (1984) puis Albina Maestrey et al. (1987), la quantité d'azote accumulée par les plantes est faible au début de la végétation puis augmente de manière rapide par la suite. Avec la fructification, une étape de grande accumulation s'initie. Ainsi, à la fin du cycle végétatif, près de la moitié de l'azote extrait par la plante peut se retrouver dans les fruits. Ceci amène à appréhender l'importance d'une provision adéquate des plantes de tomate en éléments nutritifs pour garantir une bonne fructification.



### **Extraction et exportation des nutriments par la culture de la tomate**

Greenwood et al. (1980), considèrent que l'information relative à la variation des contenus en nutriments des plantes de tomate est limitée, bien que cette information soit un critère pour l'utilisation de l'analyse des plantes dans l'établissement de ses besoins nutritionnels.

D'après Ward (1964), cité par Morard (1984), de l'extraction totale de nutriments faites par les plantes, de 20 à 30% correspondent à la période allant du début du cycle végétatif à l'initiation de la fructification.

Les cultures maraîchères extraient du sol la plus grande quantité de substances nutritives pendant les étapes de développement, étapes au cours desquelles ces cultures élaborent les plus grandes quantités de matière organique. Cette période correspond à l'accroissement absolu par unité de temps le plus élevé (Guenkev, 1969). Cadahia et Hernando (1966), dans une étude de l'évolution de l'azote, du phosphore, du potassium et autres éléments nutritifs dans les plantes de tomate tout au long de leur cycle végétatif, ont montré que la floraison et la maturation des fruits sont les périodes au cours desquelles se produisent les changements les plus nutritifs.

La plante de tomate absorbe l'azote et le potassium en grandes quantités tandis que l'exigence pour le phosphore est plus faible. Papadopoulos (1991), reporte que bien que seulement 1% du poids total de la plante de tomate soit formé par les nutriments inorganiques, les apports d'engrais minéraux sont nécessaires car ces engrais jouent un rôle très important dans la croissance et le développement des plantes de même que la quantité et la qualité des fruits. La plante de tomate absorbe en moyenne 370 kg/ha de N ; 50 kg/ha de  $P_2O_5$  ; 680 kg/ha de  $K_2O$  ; 45 kg/ha de Ca et 290 kg/ha de Mg d'après des auteurs tels que Angelov (1974), Sobulo, Fayemi et Agbola (1975, Albima Maestrey et al. (1987) entre autres.

## Besoins en engrais des plantes de tomate

### Azote

Un programme correct de fertilisation azotée de la culture de tomate varie forcément avec le niveau de rendement attendu. Ainsi, pour les plantes de tomate avec des potentiels de rendements élevés et des cycles végétatifs plus longs, les quantités d'azote nécessaires sont plus élevées que celles dont ont besoin les plantes de cycle plus court avec des potentiels de rendements plus faibles (De Geus, 1967), Angelov (1974), reportent un accroissement du rendement jusqu'à un niveau donné lorsque l'on augmente la dose d'azote ; à partir de ce niveau, tout apport d'azote entraîne une diminution de rendements.

Sobulo, Fayemi et Agbola (1975), ont rapporté une forte réponse de la plante de tomate à la fertilisation azotée au Nigeria où des rendements de 20 t/ha ont été obtenus avec l'application de 33 kg/ha d'azote pour les variétés précoces. Quant aux variétés tardives, 16 t/ha de tomate ont été récoltés avec l'apport de 60 kg/ha d'azote. La dose de 80 kg/ha dans ces conditions a été excessive car une diminution des rendements a été observée. Albina Maestrey et al. (1987), travaillant sur la tomate de printemps sur les sols Ferrallitiques rouges de Cuba, ont montré une tendance descendante de l'efficacité agronomique des doses élevées d'azote.

Everett (1976) a, pour sa part, signalé une diminution de rendements et de la taille des fruits de tomate avec l'apport de doses supérieures à 240 kg/ha d'azote.

Tout ce qui précède montre l'influence des conditions géographiques, édaphoclimatiques et des caractéristiques génétiques sur le comportement de la culture de tomate dans sa réponse aux apports d'engrais.

Dans des sols sableux avec de faibles teneurs en matière organique et azote disponible en Israël, des rendements de 64 t/ha de tomate ont été obtenus avec l'apport de 150 kg/ha de N (Palevitch, 1965).

Au Porto-Rico, sur des sols argilo-sableux, Azzam et Samuels (1964), ont pu augmenter les rendements de tomate de 27 t/ha avec l'apport de 120 kg/ha d'azote. Sur des sols rouges, par contre, Abrams, Cruz et Julian (1975), ont signalé que les rendements les plus élevés étaient obtenus avec des doses avoisinant 224 kg/ha de N. Sabulo, Fayemi et Agboala (1975), sur des sols de savane du Nigeria ont montré que 60 kg/ha de N constituait la dose optimale pour la production de tomate. Saxena, Locascio et Lucas (1975), sur des sols argileux de la Guyane ont, avec l'augmentation

de la dose d'azote, obtenu des accroissements linéaires des rendements comme c'est souvent le cas en été, bien qu'à cette époque citée, les doses d'azotes sont souvent plus faibles. Pesaud, Locascis et Geraldson (1976), en Floride, ont estimé les besoins en azote des plantes de tomate pour une production optimale à 180 kg/ha. Everett a, pour sa part, signalé qu'à partir de 240 kg/ha d'azote, le rendement commercial et la taille des fruits ont diminué.

Cszinsky et Schuster (1980), ont rapporté qu'au printemps, les fortes doses d'engrais n'augmentent pas significativement les rendements de la tomate en comparaison avec les faibles doses. Randawa, Nandouri et Singh (1977), ont quant à eux montré que sur les sols franco-sableux de l'Inde, les rendements commerciaux maximaux ont été obtenus avec 150 kg/ha d'azote ; tandis que Gupta et Rao (1978), au printemps ont démontré qu'avec l'application de 100 kg/ha d'azote, les rendements les plus élevés ont été obtenus avec les plus fortes teneurs en solides solubles dans les fruits.

Bar-Yosef et Sagiv (1982), ont montré que le rendement total de la tomate est fonction de la dose d'azote appliquée. Ils ont déterminé l'expression mathématique de cette dépendance :  $Y = 0,017 x + 35,83$  où X = dose d'azote en kg/ha et Y = rendement total de tomate en t/ha.

Ces mêmes auteurs ont signalé que l'extraction maximale a représenté seulement 30% de l'azote appliqué. Cette faible efficacité dans l'utilisation par les plantes de l'azote apporté a été expliquée par l'apport excessif d'azote de manière tardive c'est-à-dire à un moment où la demande en azote par les plantes était faible.

En Hollande, les recommandations pour l'application de l'azote dans la culture de la tomate étaient les suivantes :

- 75 - 150 kg/ha lorsque la quantité d'azote soluble dans la solution du sol est inférieure à 6mg/100 g de sol en début de végétation
- moins de 10 kg/ha au cours des étapes très avancées du cycle végétatif.

Il faut noter que la fertilisation azotée basée sur l'analyse de sol n'est pas une pratique généralisée et les résultats de recherche dans ce domaine sont divergents (De Geus, 1967).

Van Eysings (1971), a rapporté l'obtention de rendements de tomate optimaux lorsque le sol contenait 7,6 mg d'azote soluble dans 100 g de sol sec. Dans une étude réalisée dans le but de déterminer les besoins des plantes de tomate en azote à travers l'analyse de sol, Sobulo et Jaiyola (1977), ont montré que les plus faibles rendements étaient obtenus avec un niveau de 9 ppm d'azote sous forme de nitrate (NO<sub>3</sub>).

Bar Yosef et Sagiv (1982), ont montré que pour obtenir les rendements optimaux, les concentrations de nitrate dans la solution du sol devraient être d'environ 200 ppm 140 jours après le semis.

Cornforth (1974), considère que les analyses de laboratoire pour déterminer les capacités du sol à approvisionner les plantes en azote avaient très peu de valeur. Ceci est dû au fait que la disponibilité de l'azote dans le sol pour les plantes dépend de plusieurs facteurs. L'auteur considère donc que les calculs des quantités d'azote à apporter devraient tenir compte des besoins des cultures sur la base du type du sol, du climat, etc. et en se fixant une efficacité d'extraction d'environ 50%.

A Cuba, la fertilisation azotée de la tomate se fait en considérant notamment la texture du sol dans le but d'envisager les pertes potentielles de cet élément. Les résultats de recherche disponibles montrent qu'il n'y a pas de différences quant aux différents potentiels de rendements par variété, période, techniques culturales (agrotechnie et phytotechnie) pratiquées dans la zone. Ce fait peut s'expliquer par le faible nombre de recherches menées en la matière.

Guzman et al. (1979), ont montré que l'application de 100 à 150 kg/ha d'azote sur les sols Ferrallitiques rouges en hiver était la pratique idéale.

Martin et Lewis (1979), ont signalé un effet favorable de l'azote sur le rendement de la tomate variété "Campbell-28". Ils ont également rapporté que les rendements les plus élevés de tomate variété "Manalucie" ont été obtenus en hiver avec l'application de 225 kg/ha d'azote ; quant à la variété "Placero chileno", la dose la plus adéquate en été fut de 75 kg/ha. Dans les sols sableux de Pinard del Rio, les meilleurs rendements de tomate ont été obtenus avec l'apport de 100 kg/ha d'azote (Gonzalez et al., 1984). Dans les sols grisâtres, Almaguer, Pérez et Gonzalez (1985), ont estimé à 103 kg/ha d'azote l'optimum pour l'obtention des meilleurs rendements.

Aussi bien dans les sols sableux que grisâtres, il a été démontré que le fractionnement de l'azote est meilleur par rapport à son application totale lors du semis (Diaz et al., 1984 ; Fonseca, Cardoza et Verdecia, 1984).

### **Phosphore et Potassium**

L'efficacité des engrais dans l'approvisionnement des plantes en phosphore dépend en grande partie de l'intensité et du temps d'augmentation de la concentration du phosphore dans la solution du sol, à proximité du système racinaire de la plante (Guerrero, 1980).

Selon Uexcull (1979), l'assertion antérieure de Guerrero (1980) revêt une importance particulière sous les tropiques où la tomate est généralement cultivée sans un système de non contrôle de la luminosité alors qu'elle est soumise à des périodes alternatives de faibles et de fortes quantités d'eau disponible.

Quant au potassium, de nombreux auteurs estiment que son efficacité est supérieure à celle du phosphore et est toujours au-delà des 50% à l'exception des sols des régions très pluvieuses avec une faible capacité d'échange cationique (Guerrero, 1980).

Les besoins de la culture de tomate en potassium dépendent, par ailleurs, de l'énergie de liaison par laquelle le potassium interchangeable est retenu par le sol. Ainsi, à quantités égales de potassium interchangeable dans le sol, l'assimilation de cet élément par les plantes est plus élevée dans les sols avec argiles 1 :1 et d'hydroxyde que dans ceux avec argiles de type 2 :1.

A Cuba, Ortega (19874), a rapporté que la fixation du potassium est deux fois plus élevée dans les sols gris avec des carbonates que dans les sols Ferrallitiques rouges. Brunet et Granda (1974), n'ont quant à eux rapporté aucune fixation de potassium dans les sols Ferrallitiques rouges compactés.

Le degré de saturation par rapport aux autres cations est aussi un facteur qui joue sur la disponibilité du potassium dans le sol. Frie (1978), estime que les valeurs du rapport  $Ca + Mg/K$  supérieures à 100 indiquent une forte réponse à l'application du potassium.

Les sols Ferrallitiques Rouges de Cuba, de par leur nature, sont beaucoup plus pauvres que les sols gris notamment en potassium interchangeable. Il faut signaler que les sols gris présentent un rapport  $Ca + Mg/K$  plus ample. Nonobstant, Fundora *et al.*, (1980), ont rapporté des teneurs en potassium interchangeable plus élevées dans les sols Ferrallitiques Rouges que dans les gris. Ceci est dû à la fertilisation potassique intense reçue par les sols Ferrallitiques Rouges durant de nombreuses années. Par ailleurs, la tomate présente des différences variétales prononcées quant à son aptitude à absorber le potassium (Besford, 1979).

Dans la région ouest des Etats-Unis d'Amérique, les recommandations se basent sur des applications d'azote et des quantités modérées de phosphore, car la majorité des sols y sont riches en potassium et bien pourvues en phosphore.

Selon De Geus (1967) et Navarro et Locascio (1971) en Floride, dans les sols sableux ou sableux francs, de fortes doses d'engrais sont nécessaires ; néanmoins, récemment il a été prouvé qu'avec des doses faibles de phosphore et potassium, les rendements marchands et la taille des fruits peuvent être améliorés (Csizinsky et Schuster, 1980).

Dendas et Coppin (1964), recommandent pour les alluvions du Congo, 155 kg/ha de  $P_2O_5$  et 275 kg/ha de  $K_2O$ . Iturri, Suarez et Levand (1964), recommandent pour le Pérou l'application de 60 à 80 kg/ha de  $P_2O_5$  et 0 à 60 kg/ha de  $K_2O$ .

Garcia (1965), dans les sols alluviaux avec de fortes teneurs en P et K, a obtenu un effet dépressif du phosphore et du potassium. Dans les sols de Colombie avec des caractéristiques similaires, Jaramillo (1982) a, quant à lui, obtenu des rendements élevés avec l'application de 75-50-50 kg/ha de N,  $P_2O_5$  et  $K_2O$ .

Sobulo, Fayemi et Agboala (1975), dans des essais conduites au Nigeria, ont montré que pour les sols de la savane, de faibles doses sont nécessaires (20 à 60 kg/ha de  $P_2O_5$  et  $K_2O$ ). Dans les oxisols de Porto-Rico, un effet favorable du phosphore a été constaté avec des doses allant jusqu'à 224 kg/ha de  $P_2O_5$  tandis que très peu de réponse a été obtenue avec le potassium du fait du niveau élevé de cet élément dans le sol (Abrams, Gruz et Julian, 1975).

Jaramillo, Munoz et Cardona (1978), ont enregistré des productions élevées de tomate avec l'application de 50 kg/ha de  $K_2O$  dans des sols avec des teneurs variables de P et K. Narong (1980), dans des sols avec des teneurs également variables de P et K, a rapporté qu'en général, la réponse de la tomate au potassium est moindre que celle au phosphore.

Vazquez et Gonzalez (1980), dans les sols argileux du Mexique avec des teneurs faibles en phosphore et élevées en potassium, ont montré que la meilleure dose de phosphore a été de 120 kg/ha de  $P_2O_5$ . Les auteurs sus-cités n'ont pas rapporté de réponse des plantes de tomate au potassium.

Sanchez (1977), affirme que les sols fortement évolués des tropiques sont généralement très déficients en phosphore et que des réponses à la fertilisation phosphorique y ont été très prononcées. L'auteur ajoute que les doses adéquates pour l'obtention des rendements optimaux varient de 100 à 150 kg/ha de  $P_2O_5$ .

L'auteur sus-cité affirme d'autre part que sous les tropiques, la réponse au potassium est très liée à la sensibilité de l'espèce cultivée. A ce propos, l'auteur ajoute que certains chercheurs ont publié des réponses à la fertilisation mais ils n'ont pas trouvé une relation entre la teneur du sol en l'élément concerné et la réponse de la culture à son apport.

Marin (1968) et Marin et Gomez (1975), estiment que 30 ppm de P et 0,3 meq de  $K^+$  sont des teneurs faibles tandis qu'avec des valeurs supérieures à celles énumérées, le

sol est considéré comme possédant des teneurs acceptables pour la tomate. Ainsi, ces auteurs recommandent l'application de 90 à 120 kg/ha de  $P_2O_5$  et 120 kg/ha de  $K_2O$ .

Martini (1970), affirme quant à lui que, pour la tomate, le sol est déficient en phosphore lorsqu'il contient moins de 2,87 ppm de P soluble. Dans les sols avec des valeurs de potassium inférieures à 0,26 meq/100 g de sol, les plantes ont présenté des symptômes de déficience alors qu'avec 0,38 meq/100 g de sol, aucun symptôme de déficience n'a été observé. Selon l'auteur, la valeur optimale est de 0,6 meq/100 g de sol. La teneur en potassium, exprimée sous forme de pourcentage de saturation du complexe absorbant du sol n'est pas dépende du degré de déficiences naturelles.

Par ailleurs, Uzo (1970), cité par Villegas *et al.* (1983), affirme que la connaissance du phénomène d'absorption offre la possibilité de baser les recommandations d'engrais sur la détermination directe de la quantité de phosphates nécessaires pour amener à l'optimum, la teneur du sol en un élément donné. Selon cet auteur, de nombreux chercheurs recommandent l'usage des isothermes d'absorption phosphatique pour estimer les besoins de phosphore dans les sols tropicaux et subtropicaux.

Avec la méthode précitée, Swiader et Morse (1982), ont rapporté que la quantité optimale de phosphore dans la solution du sol pour la tomate est de 0,2 ppm de phosphore et que pour obtenir ladite quantité optimale de phosphore, il est nécessaire d'appliquer 131 kg/ha de phosphore dans un sol de capacité de rétention considérée comme faible ou modérée.

Bien que la concentration optimale de phosphore déterminée par les auteurs sus-cités coïncide avec celle rapportée par d'autres chercheurs tels que Jones et Fox (1978), il semble que l'application de la méthode induit une sur-estimation de la dose requise par la culture concernée. Si l'on tient compte du fait que pour d'autres sols avec des valeurs de rétention supérieures, les doses estimées seraient également supérieures.

En réalité, il est évident qu'il reste beaucoup de questions à élucider quant à la relation entre les nutriments du sol, la productivité des plantes et le diagnostic de la fertilisation en général.

A Cuba, la majeure partie des recherches ont été faites sur les sols Ferrallitiques Rouges en hiver. Gonzalez (1972), a rapporté une réponse au phosphore dans les sols rouges de Villa Clara et a recommandé l'application de 160 kg/ha de  $P_2O_5$ .

## ***Fertigation localisée***

La fertigation localisée a recommencé à être essayée en Allemagne en 1899 et aux Etats-Unis d'Amérique en 1918, avec l'utilisation des tuyauteries poreuses ou perforées et enterrée. Le système s'était alors révélé cher du fait du type de tuyauterie employé. Aussi, présentait-il d'énormes problèmes d'obstruction par les racines des plantes (Medina, 1981).

Les expérimentations similaires ont également été réalisées dans d'autres pays comme Israël, Japon, Canada, Pays-Bas, etc... Comme en Allemagne et aux Etats-Unis d'Amérique, elles n'ont pas abouti à des résultats concluants (Karmeli et Kelly, 1974).

D'après Susai et Chablass (1976) et Cabrera et Hernandez (1979), l'on peut affirmer que le système de fertigation localisée tel qu'il est connu actuellement a connu le jour en Angleterre après la Seconde Guerre Mondiale dans les Serres, les pépinières et la jardinerie. Les gouttières d'eau utilisées étaient des microtubes. Cependant, ce fut dans les années 60 qu'avec le perfectionnement des techniques de fabrication du plastic commença l'expansion du système en Israël.

Différents essais conduits dans ce pays ainsi qu'en Angleterre et en Australie ont permis de confirmer la validité du système ainsi qu'ils ont permis de parfaire les connaissances relatives à la fertigation localisée (Medina, 1981).

## **Caractéristiques**

**a-** L'eau et les engrais sont apportés dans la rhizosphère des plantes. Ils s'infiltrent dans le sol suivant les directions horizontale et verticale. En cela, le système de fertigation localisée diffère substantiellement de l'irrigation traditionnelle où prédominent les forces de gravité.

**b)** Seule une portion du sol dénommée bulbe humide, est mouillée. Ceci a une influence sur la distribution des racines des plantes et sur la nutrition de celles-ci (Ramos, Castell et Gomez, 1987). Aussi, les pertes d'eau par évaporation et infiltration sont considérablement réduites bien que les besoins en eau soient très variables.

**c)** Le bulbe humide varie selon les caractéristiques du sol, le débit de l'émetteur d'eau et le temps d'application de l'eau

**d)** L'existence de zones humides et de zones sèches (ces dernières non explorées par les racines de plantes) amène à considérer, à certains égards,



cette forme de culture comme une culture en bandes avec un système racinaire inférieur à la normale (Medina, 1981).

**e)** Il est nécessaire l'apport fréquent d'engrais car du fait du mouvement permanent de l'eau dans le sol, le lessivage des nutriments peut être intensif (Cadahia, 1989)

**f)** La maintenance d'un niveau optimal d'humidité dans le sol entraîne une faible tension d'eau. Le niveau d'humidité qui est maintenu dans le sol est, en effet, inférieur à la capacité de champ. Ceci est très difficile à obtenir avec les autres systèmes d'irrigation (Madrid, 1991).

**g)** Les rendements des cultures sont accrus avec une amélioration de la qualité des récoltes. Des fois, on enregistre une anticipation de la maturité des récoltes (Madrid, 1991).

**h)** L'efficacité des engrais est accrue du fait de l'amélioration de la mobilité et de leur distribution plus homogène des nutriments dans le bulbe humide du sol (Pizarro, 1987).

**i)** Les coûts de production sont réduits du fait de l'économie conjointe de l'eau, des engrais, de la main-d'œuvre et des opérations culturales.

## **Avantages**

**a)** La fertigation localisée favorise un immense mouvement des nutriments vers le système racinaire grâce au flux de masse dû à une plus grande humidité du sol (Mehel et Von Brauschweig, 1972 ; Ferrer *et al.*, 1987). De ce fait, l'efficacité des nutriments est améliorée à travers un flux de masse plus grand et des ions en mouvement dans la solution du sol plus nombreux (Madrid *et al.*, 1991).

**b)** D'importantes économies d'eau et d'engrais, de main-d'œuvre et produits phytosanitaires sont faites. Des économies de 50% par rapport aux systèmes conventionnels sont courantes. Des fois, des valeurs plus importantes sont enregistrées (Medina, 1981).

**c)** L'avantage majeur de la fertigation réside, sans aucun doute, dans la possibilité d'approvisionner au jour le jour les cultures en nutriments, de façon totalement contrôlée en fonction des besoins momentanés des plantes selon les variétés, les âges, l'état de végétation, le climat, etc...

**d)** La fertigation localisée permet d'irriguer n'importe quel type de terrain aussi bien du point de vue relief que de teneur en nutriments.

**e)** Il est possible d'utiliser les eaux de pire qualité. En effet, les eaux qui, selon les normes internationales de qualité, sont dangereuses ou inadéquates pour l'irrigation, sont utilisées dans le système de fertigation localisée sans aucun problème dans les cultures maraîchères. Il est connu que la tension totale que peut supporter une plante est la somme de la tension osmotique ( $W_m$ ) due aux forces entre les particules du sol.

$$W = W_o + W_m$$

Du fait que sous l'irrigation localisée,  $W_m$  est très petite, on peut augmenter  $W_o$  pour obtenir une même tension total  $W$ . C'est dire concrètement qu'on peut utiliser des eaux relativement salées (Medina, 1981).

**f)** La production est accrue avec une anticipation des récoltes et une amélioration de la qualité des fruits. Ceci est du au fait que les besoins en eau et en nutriments des cultures sont satisfaits à chaque instant (Madrid, 1991).

**g)** La fertigation localisée permet de réaliser simultanément l'irrigation, la fertilisation et autres opérations culturales. Ceci est du au fait de l'existence de zones sèches dans le champ.

**h)** La fertigation localisée permet de réduire les nécessités énergétiques des plantes pour absorber l'eau et les nutriments du sol. Ce fait est du à un niveau optimal d'humidité, de nutriments et d'aération dans le sol (Goldberg, Gormat et Rimon, 1976 ; Bucks, Nakayama et Warrick)

**i)** La fertigation localisée permet de contrôler l'eau et les engrais. En effet, il est possible de fixer de manière très précise les quantités d'eau et de nutriments ainsi que les fréquences d'apports aux plantes de ceux-ci. Les plantes ne souffrent pas de la tension occasionnée par le stress hydrique. La possibilité d'apporter directement, aux racines des plantes, des quantités contrôlées d'eau et de nutriments favorise la croissance et la vigueur des jeunes plantes (Vermeiren, 1986).

**j)** La fertigation localisée n'altère pas la structure du sol.

**k)** La fertigation localisée permet d'utiliser des sols difficiles (sols avec des vitesses d'infiltration d'eau de 2 à 4 mm/h). L'irrigation conventionnelle sur ces

types de sol est très difficile. Par ailleurs, les sols très légers ne peuvent pas être irrigués par des techniques d'irrigation de superficie. Dans ces types de sol, l'irrigation localisée a été utilisée avec succès (Vermeiren, 1986).

**j)** Avec l'utilisation de la fertigation localisée, l'incidence des plantes indésirables, des maladies et autres ravageurs est réduite.

**l)** Avec l'utilisation de la fertigation localisée, l'incidence des plantes indésirables, des maladies et autres ravageurs est réduite.

**m)** La fertigation localisée permet une réduction des dégâts d'exploitation. Elle permet également l'utilisation de faibles débits d'eau : la pression nécessaire pour l'irrigation localisée est en général par aspersion classique.

**j)** La fertigation localisée permet l'automatisation et la programmation du système (Bresler, 1978 et Bucks, Nakayama et Warrick, 1982).

### **Inconvénients**

Ils sont relativement peu nombreux et se résument en :

- a) D'après Cadahia (1989), l'application localisée d'engrais minéraux et autres produits chimiques dissouts et ceci de façon continue dans des volumes limités de sol présente certains problèmes :
  - apparition d'effets antagoniques et synergiques
  - la relative méconnaissance de l'utilisation des engrais à base d'oligo-éléments
  - l'impérieuse nécessité de sélectionner les types d'engrais à utiliser.
- b) C'est un système très coûteux nécessitant un investissement initial important.
- c) Des erreurs dans sa conception ou son installation peuvent occasionner des pertes de récolte par une déficience soit d'eau, soit de nutriments, soit des deux (Medina, 1981).
- d) L'obstruction des gouttières d'eau
- e) Son utilisation nécessite un personnel qualifié.

### **Uniformité de la distribution**

L'uniformité de l'émission est la mesure statistique de la variation dans la décharge des gouttières, exprimée en pourcentage (Bralts et Edwardq, 1983).

Dans le système de fertigation localisée, l'approvisionnement des plantes en eau et engrais en de petites quantités réduit les pertes en eau et engrais à leur plus simple expression.

Nonobstant, il existe une série de facteurs (caractéristiques des gouttières et les défauts de fabrication, les pertes par friction dans le réseau de distribution, les différences de niveaux des sites où sont installés les gouttières, les obstructions de tout genre, la température de l'eau dans les tuyauteries, etc...), qui influencent cette efficacité.

Des facteurs susmentionnés, certains échappent totalement au contrôle de l'homme, tandis que les autres sont dus aux manipulations (Karmeli et Keller, 1974). Parmi les facteurs dont le contrôle échappe à l'homme, le plus important est l'évapotranspiration. Quant aux facteurs dus à la manipulation, le plus important est l'uniformité de l'émission (Medina, 1981).

### **Coefficient d'uniformité**

Le rapport entre le débit minimal et le débit moyen des gouttières est un facteur essentiel. Ce coefficient, proposé par Karmeli et Keller (1974), est défini comme le coefficient d'uniformité (C.U.) de l'irrigation localisée.

Les auteurs susmentionnés utilisent le coefficient d'uniformité comme une mesure de l'efficacité dans le calcul de la dose brute d'irrigation, la fréquence de l'irrigation, le débit de l'installation et le choix du type d'émetteur d'eau.

Karmeli et Keller (1974), définissent le coefficient d'uniformité comme "le produit du coefficient de qualité du fabricant, corrigé en fonction du nombre de gouttières par plante et exprimé un pourcentage, multiplié par le quotient issu de la division entre le débit minimal absolu (déterminé selon la courbe-pression) et le débit moyen de l'ensemble des gouttières.

**C.U. = 100 (Q mim / Qmoy). Mr. F(e) avec**

**Mr. F(e) = 1 - (1,27 cvf/e<sup>0,5</sup>)**

**où :**

**Qmin = débit minimal**

**Q moy = débit moyen**

**Mr = Coefficient de qualité du fabricant**

**F(e) = facteur de correction qui tient compte du nombre d'émetteur par plante.**

**Cvf = Coefficient de variation de fabrication.**

Le coefficient de qualité du fabricant est le quotient issu de la division du débit moyen du quart inférieur des gouttières (classés par ordre croissant de débit) par le débit moyen d'un échantillon évalué à une pression de référence.

De cette formule, l'on peut apprécier que l'uniformité de l'irrigation dépend de deux facteurs fondamentaux :

1. Le rapport entre le débit minimal et la moyenne d'un module d'irrigation qui peut provoquer de graves dommages
2. Les facteurs qui affectent les débits des gouttières lors du processus de fabrication.

Amo et al. (1991), rapportent que le coefficient d'uniformité peut se calculer suivant la formule :

$$C.U = 50 (m/x+(M) \geq 90\%$$

où :

**m = débit moyen (l/h) de 25% des gouttières de faible débit**

**M : débit moyen (l/h) de toutes les gouttières du système.**

Bralts et Edwards (1983), affirment en guise d'orientation que la formule suivante peut être utilisée :

$$M - m < 10 \%$$

## **Propriétés fondamentales des engrais à utiliser dans la fertigation localisée**

L'utilisation de façon combinée de l'eau et des engrais oblige à connaître certaines propriétés fondamentales de ces dernières et leurs effets sur l'eau d'irrigation du fait notamment de la très forte sensibilité du système de fertigation aux problèmes d'obstruction.

### **Propriétés fondamentales de certains engrais**

**Tableau 1 : Solubilité (Medina, 1971)**

<b><i>Engrais</i></b>	<b><i>Solubilité à 20°C (g/l)</i></b>
Ammoniaque	97
Nitrate d'ammonium	1185
Sulfate d'ammonium	700
Nitrate potassique	135
Nitrate de sodium	730
Urée	780 – 1190
Superphosphate simple	20
Superphosphate triple	40
Sulfate potassique	67
Chlorure de sodium	360
Chlorure de potassium	277
Chlorure de calcium	600
Borax	25 - 50
Molybdène sodique	560
Phosphate naturel	---

**Tableau 2 : Composition en éléments nutritifs (Medina, 1981)**

<i>Engrais</i>	<i>N</i>	<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>Ca</i>
	<i>(%)</i>			
Ammoniaque	82	--	--	--
Nitrate d'ammonium	33-34	--	--	--
Sulfate d'ammonium	21	--	--	24
Nitrate de potassium	13	--	44	--
Nitrate de sodium	16	--	--	--
Urée	46			
Superphosphate simple	--	18-20	--	12
Superphosphate triple	--	45-46	--	1
Chlorure de potassium	--	50-63	--	--

**Tableau 3 : Indice de sel (Medina, 1981)**

<i>Engrais</i>	<i>Indice de sel (%)</i>
Ammonium	47,1
Nitrate d'ammonium	104,7
Sulfate d'ammonium	69,0
Nitrate de potassium	73,6
Nitrate de sodium	100,0
Urée	75,5
Superphosphate simple	7,8
Superphosphate triple	10,1
Sulfate de potassium	46,1
Chlorure de sodium	153,8
Chlorure de potassium	116,3
Phosphate naturel	8,1

Logiquement, la quantité de sel apporté au sol est plus grande que l'indice de sel est levé et partant, plus grande est le risque de salinité du sol. Du fait, dans l'apport d'engrais, il est impérieux de rechercher un équilibre entre la solubilité des engrais, leur teneur en principes nutritifs et leur indice de sel (Tyler, 1972).

## **Effets des engrais sur les propriétés physiques de l'eau d'irrigation**

La dissolution des engrais dans l'eau altère les caractéristiques physiques de celle-ci.

D'après Gimenez (1991), ces altérations sont les suivantes :

- **Modification de la conductivité électrique** : l'addition des divers engrais à l'eau augmente la teneur de l'eau en sels et, par conséquent, modifie sa conductivité électrique. Les engrais à la concentration qu'ils sont incorporés à l'eau, modifient négativement sa qualité du point de vue de l'effet osmotique. L'idéal est que l'augmentation de la conductivité électrique de l'eau ne dépasse pas 1 mmho/cm. C'est ce qui justifie qu'il est recommandé de fractionner autant que se peut la fertigation localisée ; de cette façon, la conductivité électrique de l'eau serait comprise entre 2 et 3 mmho/cm.
- **Modifications du pH** : du fait de leur caractère fortement dissociable, les engrais minéraux influent sur les propriétés chimiques de l'eau et notamment sur son pH avec les conséquences que ce fait pourrait entraîner.  
Lorsque le pH augmente, il y a le risque de précipitation du calcium car lorsque la solution est alcaline, le pouvoir de solubilité du cation  $Ca^{++}$  diminue, non seulement les obstructions sont évitées, mais également l'installation est nettoyée.
- **Modifications de la température** : les engrais azotés présentent une réaction endothermique ; ceci veut dire qu'ils refroidissent l'eau dans laquelle ils sont dissouts. Ainsi en guise d'exemple, 100 g de nitrate d'ammonium 33,5% dissouts dans un litre d'eau provoque une baisse de la température jusqu'à 29°C.

## **Engrais utilisables**

En théorie, tous les types d'engrais peuvent être utilisés dans l'irrigation localisée. Cependant, du fait des énormes problèmes qu'ils pourraient poser notamment les obstructions des émetteurs d'eau ; et qui ont été largement développés plus haut, il faut choisir les engrais solubles dans l'eau. Le phosphore est l'élément le plus difficile à appliquer en irrigation localisée ; en effet, en plus du fait qu'il est peu soluble, il existe le risque de précipitations dues aux réactions chimiques qui pourraient avoir lieu entre le phosphore et le calcium contenu dans l'eau d'irrigation. Ces réactions amènent le phosphore à passer de l'état de phosphate monocalcique à phosphate bicalcique. Il faut noter que des succès ont été enregistrés dans l'utilisation des engrais contenant des



poly phosphates (tripolyphosphates) et les composés organiques phosphatés tels que les glycérophosphates. Les tripolyphosphates, utilisés à des concentrations moyennes précipitent tandis qu'à fortes concentrations (plus de 500 ppm de phosphate) ou faibles concentrations (moins de 30 ppm de phosphore), ils ne précipitent pas (Tyler, 1972).

D'après Medina (1981), les engrais complexes aussi sont utilisés avec succès dans la fertigation localisée.

Ces derniers temps, il a été mis sur le marché, des engrais spécifiques pour les émetteurs-goutteurs. Ce sont des mélanges plus solubles qui contiennent certains oligo-éléments. L'ammoniaque liquide injecté dans l'eau, augmente le pH de celle-ci et peut occasionner des précipitations de sels de calcium et magnésium. Les sels ammoniacaux non solubles ne causent aucun problème à l'exception du phosphate d'ammonium. L'urée non plus n'occasionne de problème sauf lorsque l'eau contient l'enzyme uréase qui est souvent dans les eaux souillées par les algues. L'injection de façon continue de l'azote peut occasionner des obstructions du fait de la croissance microbienne. Ceci amène à veiller sur la qualité des eaux de certains puits dont la teneur en azote (nitrate) est élevée. L'ion nitrate se déplace avec le mouvement de l'eau et finit par se loger dans les bordures du bulbe humide du sol. Ceci réduit l'efficacité de l'azote appliqué par fertigation localisée. Il faut donc appliquer de petites quantités d'azote lors de chaque irrigation.

### **Quantité d'engrais dans le réservoir du système de fertigation**

Medina (1981), rapporte que la quantité d'engrais à verser dans le réservoir du système de fertigation se détermine suivant la formule ci-après :

$$C_i = G_o / K_d \{V_t - 1 [(1-Pr)/D_a] \times G_o\}$$

Où :

$C_i$  = concentration initiale de l'engrais dans le réservoir (kg/l)

$G_o$  = poids net de l'engrais (kg)

$V_t$  = volume utile du réservoir (l)

$Pr$  = porosité de l'engrais (%)

$D_a$  = densité apparente (kg/dm<sup>3</sup>)

$K_d$  = coefficient de dissolution de l'engrais (%)

Selon la Direction Nationale d'Irrigation et de Drainage de Cuba (1990), la quantité nette d'engrais à verser dans le réservoir s'obtient suivant la formule :

$$G_o = D_{fa} \times A / C$$

où :

$G_o$  = quantité nette d'engrais à verser dans le réservoir (kg/ha)

$D_{fa}$  = dose fractionnée par application (kg/ha)

$A$  = superficie à irriguer (ha)

$C$  = teneur de l'engrais en éléments nutritifs déterminés (%).

### **Mélanges et effets des engrais sur l'eau d'irrigation**

Les mélanges d'engrais sont nécessaires soit pour élaborer une solution nutritive équilibrée ou pour obtenir la quantité d'éléments nutritifs nécessaires pendant l'irrigation. D'après Rincon (1991), une bonne connaissance des effets des différents engrais aussi les uns sur les autres que sur l'eau d'irrigation, permettra un usage adéquat de ces engrais dans le but d'éviter d'une part les précipités qui détériorent l'équilibre établi et d'autre part les obstructions dans le réseau d'irrigation.

**Tableau 4** : Quelques mélanges d'engrais et conseils sur leur usage  
(Rincon, 1991)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	+	X	•	+	•	X	X	X	+	•	•	X	X	+	+	•
2	X	+	+	+	+	+	•	X	+	+	+	+	+	X	X	+
3	•	+	+	+	X	+	•	•	X	+	+	+	+	•	+	+
4	+	+	+	+	X	+	X	X	+	+	+	+	+	+	X	X
5	•	+	X	X	+	X	•	•	X	X	+	X	X	•	•	X
6	X	+	+	+	X	+	X	X	+	+	+	+	+	+	+	X
7	X	•	•	X	•	X	+	X	+	•	•	X	X	X	X	•
8	X	X	•	X	•	X	X	+	X	•	•	+	+	X	X	•
9	+	+	X	+	X	+	+	X	+	X	+	+	+	X	X	X
10	•	+	+	X	+	+	•	•	X	+	+	+	+	•	•	+
11	•	+	+	+	+	+	•	•	+	+	+	+	+	•	•	+
12	•	+	+	+	X	+	X	+	+	+	+	+	+	+	+	X
13	X	+	+	+	X	+	X	+	+	+	+	+	+	+	+	X
14	+	X	•	+	•	+	X	X	X	•	•	+	+	+	+	•
15	+	X	•	X	•	+	X	X	X	•	•	+	+	+	+	•
16	•	+	X	X	X	•	•	•	X	+	+	X	X	•	•	+

Légende

1- Ammonium

2- Urée

3- Cyamide calcique

4- Nitrate de sodium

5- Nitrate de calcium

6- Nitrate de potassium

7- Nitrate d'ammonium

8- Superphosphate

9- Phosphate bicalcique

10- Scories thomas

11- Phosphorites

12- Chlorure de potassium

13- Sulfate de potassium

14- Sulphate di-ammonique

15- Complexes NP – NK – NPK

16- Cendres

+: Mélanges sans aucun risque

X: Mélanges unique recommandés au moment de l'application

•: Mélanges interdits

## Matériels et méthodes

### ***Conditions expérimentales générales***

Trois essais en milieux contrôlés ont été conduits de 1993 à 1995 puis trois expérimentations en champs de 1994 à 1996. Les essais en milieux contrôlés ont servi de base pour la conception des expérimentations en champs car aucune information sur le comportement de la tomate sous fertigation goutte à goutte dans les conditions de Cuba n'était disponible.

L'un des essais a été conduit sur une planche de 1m de largeur sur 10 m de longueur sur un sol Ferrallitique rouge compacté. La variété de tomate « Floradel » a été utilisée en semis direct sur double ligne avec une distance entre plants de 40 cm et de 50 cm entre les lignes. Le dispositif expérimental est complètement aléatoire. Chaque traitement a porté sur 50 plantes desquelles 30 ont servi à collecter les données. Les deux autres essais ont été conduits dans des bacs en ciment de 25 m de longueur sur 1 m de largeur dans l'enceinte de l'Institut National des Sciences Agricoles de Cuba (INCA). Le dispositif expérimental utilisé est le systémique avec 4 répétitions.

Les expérimentations en champs ont été, quant à elles, conduites sur la Station Centrale de l'INCA, sur un sol Ferrallitique rouge compacté (Hernandez *et al.*, 1975), à San José de Las Lajas. Les principales caractéristiques chimiques et physiques initiales dudit sol sont présentées dans les tableaux 5 et 6. selon les informations fournies par MINAZ (1981), cité par Izquierdo et al. (1988), et celles contenues dans le tableau pour l'évaluation des données chimiques et physiques des sols, pris dans l'acte du Séminaire pour l'évaluation de la carte Nationale des sols échelle 1 : 25000 (MINAGRI, 1981), les valeurs contenues dans les tableaux 5 et 6, pré-cités, permettent de qualifier d'élevées les teneurs en phosphore disponible et en potassium interchangeable. Elles permettent également de qualifier de moyennes les densités réelle et apparente ainsi que la porosité totale du sol. Les teneurs en matière organique sont considérées comme faibles. Par ailleurs, ces valeurs se situent dans l'intervalle de valeurs rapportées pour les sols Ferrallitiques rouges de Cuba par Camacho (1980) et Beltran *et al.* (1995) et pour les sols Ferrallitiques rouges du Bénin par Djègui, Boissezon et Evelyne Gavinelli (1992).

**Tableau 5** : Quelques caractéristiques chimiques initiales des aires expérimentales (0-40 cm)

	pH	pH-Kcl	m.o. (%)	Pdisp (ppm)	K interch (Cmol/kg)
Expérimentation 1	6,2	5,1	2,85	255	0,71
Expérimentation 2	6,3	5,5	2,30	251	0,69
Expérimentation 3	6,2	5,3	3,00	251	0,90

Pdisp = phosphore disponible (ppm)

K interch = potassium interchangeable

mo = matière organique

**Tableau 6** : Quelques propriétés physiques du sol dans les aires expérimentales à 0,40 m de profondeur

	C.C (%)	D.A (g/cm <sup>3</sup> )	D.R (g/cm <sup>3</sup> )	Pt (%)
Expérimentation 1	33,26	1,27	2,38	54,01
Expérimentation 2	35,71	1,28	2,46	54,10
Expérimentation 3	35,89	1,28	2,51	52,37

C.C = capacité au champ

DA = densité apparente

D.R = densité réelle

Pt = porosité totale

Le dispositif expérimental utilisé a été celui des blocs aléatoires avec 4 répétitions. En ce qui concerne l'expérimentation n°3, il a été utilisé un arrangement bifactorial avec 3 niveaux d'azote et 3 de potassium.

L'aire de calcul de chaque parcelle a été de 29,4 m<sup>2</sup>. Dans toutes les expérimentations où l'irrigation goutte à goutte a été utilisée, la pression de travail dans les conduites latérales a été constante et de valeur 1,5 atmosphère. Cette constance de la pression de travail est due au fait que la pompe à eau est maintenue en état de fonctionnement durant l'application des traitements. Ainsi, le réservoir d'eau est toujours maintenu plein.

Dans toutes les expérimentations ainsi que les essais dans les bacs , la variété de tomate utilisée a été la Campbell-28, avec une croissance déterminée. La transplantation s'est réalisée entre les 38<sup>e</sup> et 42<sup>e</sup> jours après semis. Dans les bacs , la transplantation s'est réalisée entre les 38<sup>e</sup> et 42<sup>e</sup> jours après le semis, en double ligne séparée de 0,50 m (entre les lignes) avec un écartement de 0,30 m entre les plants. En champ, la distance de plantation a été de 0,30 m x 1,40 m.

Aussi bien la préparation du sol, la mise en place de la pépinière que les autres opérations culturales se sont déroulées conformément aux instructions contenues dans la Fiche Technique de la tomate (Cuba, 1984).

Le système d'irrigation goutte à goutte dans les bacs et sur la planche a été composé d'un réservoir qui approvisionne en eau grâce à une pompe mue par un moteur électrique. La pression de travail dans les conduites latérales est de 2 atmosphères.

Des tuyaux de type PVC de 50 mm de diamètre conduisent l'eau depuis le réservoir jusqu'aux différentes aires expérimentales. Des tuyaux PVC de 25 mm ont été insérés sur ceux de 50 mm pour conduire l'eau aux cultures. Les autres composantes du système ont été un filtre fait de filet, situé à la sortie de la pompe, des gouttières de type AGP, auto composées, de débit nominal de 4 l/h qui ont été connectées aux conduites latérales grâce à des micro tuyaux. Un tonneau d'une capacité de 10 l a été utilisé pour incorporer les engrais à l'eau.

Au champ, le système d'irrigation localisée a été composé d'un réservoir d'eau d'une capacité de 5 000 l, situé à 12 m au dessus du sol ; deux filtres de filet (l'un situé à la sortie du réservoir d'eau et le second à la sortie du tonneau fertigateur d'une capacité de 32 l. Les tuyaux de type PVC de 50 mm et 25 mm ont permis de conduire l'eau aux cultures. Des gouttières ont été insérées sur les tuyaux de 25 mm à des distances régulières de 0,60 m.

Le calibrage du tonneau fertigateur et la détermination des coefficients d'uniformité de la distribution de l'eau et les engrais ont été faits toutes les deux semaines. Lesdits coefficients, calculés suivant la formule de Amo *et al.* (1991), ont donné des valeurs moyennes de 92,07% pour la distribution de l'eau et 89,93% pour celle des engrais. Ces valeurs moyennes sont acceptables pour l'utilisation de l'irrigation goutte à goutte sur les cultures maraîchères selon Rincon (1991).

Dans les essais comme dans les expérimentations au champ, les engrais utilisés ont été l'urée, le superphosphate triple et le chlorure de potassium. L'azote et le potassium ont été apportés aux cultures à travers la fertigation tous les deux jours. Le phosphore a,

quant à lui, été appliqué au moment du semis ou de la transplantation, selon le cas. Le fait que cet élément ne soit pas appliqué à travers la fertigation se justifie par la faible solubilité du superphosphate triple dans l'eau ; ce qui provoquerait des obstructions au niveau des filtres et des gouttières.

Les données climatiques des aires expérimentales (précipitation, évaporation) ont été relevées journalièrement à la station Météorologique de Tapaste, sise à environ 400 m de la zone des expérimentations. Ces données figurent en annexe. L'eau a été appliquée suivant la balance hydrique des cultures. Ceci s'obtient dans la pratique par la soustraction entre les précipitations enregistrées au moment de l'irrigation et l'évapotranspiration les valeurs de l'évaporation collectées dans la Station Météorologique par le coefficient biologique des cultures selon leur stade de développement (Maria Léon et Delibatov, 1981).

### ***Description des essais et expérimentations au champ***

#### **Essai 1 : "Etude du comportement de la tomate variété Floradel sous fertigation goutte à goutte et sous irrigation par aspersion"**

Cet essai a été conduit de septembre 1993 à janvier 1994 avec les traitements ci-après :

T1 : application du phosphore et du potassium au moment du semis. L'azote a été appliqué en bande continue. Cette application a été fractionnée (un tiers au moment du semis, les deux autres tiers respectivement 25 et 50 jours après la germination).

T2 : application de l'azote et du potassium à travers l'irrigation goutte à goutte avec une fréquence de trois fois par semaine. Le phosphore a été appliqué au moment du semis. Les doses d'engrais appliquées ont été 200 ; 100 et 300 kg/ha respectivement de N ; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O

## **Essai 2 : “Etude du comportement de la tomate variété Campbell-28 sous fertigation azotée sur un substrat sol-matière organique en bacs”**

Sur un substrat composé de 50% de sol Ferrallitique Rouge compacté et 50% de résidus industriels de canne à sucre, quatre niveaux d'azote ont été étudiés. Il s'agit de 0 ; 75 ; 150 et 225 kg/ha avec une application à chaque niveau de 75 kg/ha de  $P_2O_5$  et 100 kg/ha de  $K_2O$ . L'essai a été conduit de décembre 1993 à mars 1994. Quelques caractéristiques chimiques du substrat ont été : pH en eau 6,0 ; pH en KCl 5,4 ; matière organique 5,38% ; P disponible 63 ppm et K interchangeable 1,02 cmol/kg. La norme totale d'irrigation a été de 1900 m<sup>3</sup>/ha répartie en 20 applications. Les normes partielles moyennes ont alors été de 9,5 mm.

## **Essai 3 : “Etude de la réponse de la tomate variété Campbell-28 à des doses croissantes de potassium sur zéolite en bacs ”**

La zéolite utilisée, provient du gisement “Tassjeras” dans la province de Villa Clara à Cuba. Elle est classée comme non “chargée”. Son diamètre moyen oscille entre 2,5 et 8 mm. Trois niveaux de potassium ont été étudiés. Il s'agit de 0 ; 100 et 200 kg/ha de  $K_2O$  avec l'application à chaque niveau de 200 kg/ha de N et 150 kg/ha de  $P_2O_5$ .

Dans cet essai qui a été conduit d'octobre 1994 à janvier 1995, la norme totale d'irrigation a été de 2500 m<sup>3</sup>/ha d'eau répartie en 20 applications d'une moyenne de 12,5 mm chacune.

## **Expérimentation 1: “Etude de la réponse de la tomate variété Campbell-28 à sous différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur un sol Ferrallitique Rouge”**

Conçue suite aux résultats obtenus de l'essai 1, cette expérimentation a été conduite de septembre 1994 à janvier 1995. Les traitements ont été appliqués à partir du 34<sup>e</sup> jour après le semis. Ils sont décrits comme ci-après :

- T1 (FR) : fertigation goutte à goutte avec N-K
- T2 (RL+F) : irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais N-K (la fréquence d'application de l'irrigation est similaire à celle du traitement T1 tandis



que l'application des engrais a été faite selon les instructions de la Fiche Technique de la tomate (Cuba, 1984).

- T3 (RA+F) : irrigation par aspersion de faible pression avec application manuelle d'engrais N-K selon la Fiche Technique de la tomate (Cuba, 1984).
- T4 (RA) : irrigation par aspersion de faible pression sans application d'azote ni de potassium.

Les volumes d'eau appliqués dans les traitements 3 et 4 avec l'utilisation des asperseurs CX-05 NTN de diamètres 7,1 mm et 3,17 mm à une pression d'environ 4 at, ont été contrôlés grâce à un dispositif spécial. Ce dispositif maintient une pression constante dans les conduites latérales et dégage un débit de 78 l/min.

Dans les traitements, les doses de nutriments (200 kg/ha de N ; 100 kg/ha de  $P_2O_5$  et 300 kg/ha de  $K_2O$ ) et la norme totale d'irrigation à la fin de l'expérimentation ont été identiques.

### **Expérimentation 2 : « Réponse de la tomate variété Campbell-28 à des doses croissantes d'azote sous fertigation goutte à goutte sur un sol Ferrallitique Rouge »**

Cette expérimentation a été conduite de novembre 1994 à mars 1995 et de septembre 1995 à janvier 1996. Les doses de 100 kg/ha de  $P_2O_5$  (en application de fond) et 300 kg/ha de  $K_2O$  ont été apportées pour appuyer les traitements 0 ; 60 ; 120, 180 et 240 kg/ha d'azote. La norme totale d'irrigation a été de 1975 m<sup>3</sup>/ha répartie en 20 applications d'environ 9,87 mm chacune.

### **Expérimentation 3 : "Etude de l'effet des combinaisons azote-potassium sur la culture de la tomate variété Campbell-28 sur un sol Ferrallitique Rouge sous fertigation goutte à goutte"**

Les résultats obtenus des essais et expérimentations antérieurement décrits ont permis de concevoir cette expérimentation qui a été conduite de novembre 1995 à mars 1996. Un total de 2020 m<sup>3</sup>/ha d'eau a été apporté aux plantes. Ce total s'est réparti en 20 applications d'environ 10,1 mm chacune. Le phosphore a été appliqué en fond à la dose de 100 kg/ha de  $P_2O_5$ . Les traitements appliqués ont été :

T1 : N <sub>60</sub> k <sub>0</sub>	T2 : N <sub>60</sub> k <sub>75</sub>	T3 : N <sub>60</sub> k <sub>150</sub>
T4 : N <sub>120</sub> k <sub>0</sub>	T5 : N <sub>120</sub> k <sub>75</sub>	T6 : N <sub>120</sub> k <sub>150</sub>
T7 : N <sub>180</sub> k <sub>0</sub>	T8 : N <sub>180</sub> k <sub>75</sub>	T9 : N <sub>180</sub> k <sub>150</sub>

## ***Evaluations faites***

### **Croissance et état nutritionnel des plantes**

Des mesures ont été prises toutes les deux semaines sur 10 plantes par traitement. Ces mesures ont consisté en la longueur et le diamètre des tiges (tronc de la plante). A 35 ; 70 et 105 jours après le semis, cinq plantes par traitement ont été disséquées en leurs différentes parties, à savoir les feuilles, les tiges et les racines. Avec ces différentes parties, la matière sèche (obtenue par séchage à 85° C dans une étuve) et les teneurs en N, P et K ont été déterminées.

### **Rendement et qualité interne des fruits**

L'évaluation du rendement et ses composantes a été faite sur l'aire de calcul de chaque traitement. Les fruits ont été classés selon la norme pour la qualité des fruits (MINAGRI, 1979) en tenant compte de leur diamètre équatorial.

La qualité interne des fruits a été déterminée grâce aux solides solubles totaux (% de Brix), l'acidité et le pourcentage de matière sèche. Ceci a été fait sur quatre échantillons composés de 10 fruits mûrs par traitement. Ces déterminations ont été faites en utilisant les techniques conventionnelles de laboratoire.

Pour l'expérimentation 1, en dehors des mesures ultérieurement décrites, il a été procédé à la détermination de la longueur des racines principales des plantes à 105 jours après le semis. Le degré d'enherbement des parcelles sous les différents traitements a également été mesuré. Pour ce dernier aspect, il a été procédé à un échantillonnage sur les diagonales des parcelles à l'aide d'un carré de 1m<sup>2</sup>, en neuf points et de façon totalement aléatoire. Le pourcentage de couverture a été évalué visuellement suivant la méthode de Fischer (1978). Le degré d'enherbement a été calculé suivant l'échelle de Maltzev cité par Labrada et al. (1979). Enfin, dans chaque carré, toutes les espèces de mauvaises herbes ont été répertoriées.

## **Teneurs et extractions de nutriments**

Des échantillons composés de 5 plantes ont été prélevés à trois stades différents de développement des plantes (35, 70 et 105 jours après le semis) par traitement. Chaque échantillon a été séparé en racines, tiges, feuilles ou fruits. Les différents échantillons ont été séchés dans une étuve à 65°C. Ils ont été ensuite moulus pour permettre de déterminer la masse sèche et les teneurs en nutriments. Ces données ont servi à calculer les extractions suivant la formule :

$$Q = a \times b / 100$$

Où

Q = extractions de nutriments (kg/ha)

a = masse sèche (kg/ha)

b = teneur en nutriments (% de masse sèche)

## **Mobilité des éléments N-P-K dans le sol**

Des échantillons de sol ont été pris à des profondeurs de 0-20 cm ; 20-40 cm et 40-60 cm toutes les fois que des plantes étaient arrachées pour les déterminations décrites antérieurement. Les échantillons de sol ainsi prélevés ont servi à déterminer les teneurs en N, P et K en vue de connaître la mobilité desdits éléments dans le sol.

Dans l'expérimentation 1, les teneurs en  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$  ont été également déterminées. Pour ce faire, des échantillons de sol à 0-20 cm de profondeur ont été prélevés puis rapidement introduits dans une autoclave. Ils y ont subi 4 cycles de 3 heures chacun dans le but de détruire les bactéries *Nitrosomona* et *Nitrobacter*, responsables de l'oxydation des ions "ammonium", les transformant en ions "nitrate".

## **Méthodes d'analyses utilisées**

### **Sols**

Les échantillons de sol ont été séchés et moulus. Les méthodes suivantes sont utilisées pour les déterminations ci-après :

- pH en eau et KCl : potentiomètre avec le rapport 1 :2,5 selon Hesse (1971)
- matière organique : Walkley et Black selon Jackson (1964)
- P disponible et K interchangeable : extraction selon Oniani
- CC : méthode gravimétrique

- DA et D.R. : méthode du cylindre et celle du pycnomètre respectivement
- Pt : selon la formule  $\% Pt = (1 - Pv/Pe) \times 100$
- Teneurs en  $NH_4^+$  et  $NO_3^-$  : distillations successives, en milieu basique d'abord puis en présence du réducteur décrit par Bremner (1965). Les vapeurs ont été ensuite recueillies dans une solution de  $H_2SO_4$  à 0,02 N avant d'être titrées à l'aide du NaCl à 0,02N en présence de l'indicateur "Tachiro" (alcool éthylique à 95% ; rouge de méthyl 0,1 g et bromocresol vert à 0,2 g). les teneurs en nitrates et ammonium ont été déterminées directement suivant la formule ci-après :

$$\text{ppm (NH}_4^+ \text{ ou NO}_3^-) = \frac{\text{ml (témoin)} - \text{ml(échantillon)} \times 0,02 \times 14}{\text{poids de l'échantillon}} \times 1000$$

Où

ions = facteur de conversion à ppm

14 = meq de N

0,02 = normalité du titrage

## Plantes

Les échantillons de plantes et fruits secs ont été analysés par les méthodes ci-après :

- Azote : méthode de Kjeldahl
- Phosphore : colorimétrie avec l'utilisation de l'acide aminonaftol sulfonique en milieu acide
- Potassium : photométrie de flamme

Les calculs en vue de déterminer les indices d'efficience de la fertigation goutte à goutte ont été faits. Pour ce faire, les formules suivantes ont été employées :

$$\text{Coefficient d'assimilation} = \frac{\text{kg d'élément extrait}}{\text{kg d'élément apporté}} \times 100$$

$$\text{Efficience agronomique} = \frac{\text{kg de fruits}}{\text{kg d'élément apporté}}$$

$$\text{* Efficience physiologique} = \frac{\text{kg de fruits}}{\text{kg d'élément extrait}}$$

### ***Analyses statistiques***

Les analyses statistiques ont été faites selon les différents dispositifs expérimentaux utilisés. C'est le paquet de programmes ANOVA de classification simple et double selon les conditions qui a permis la réalisation de ces analyses. Dans certains cas, la formule de rangs multiples de Duncan à 5% de probabilité a été utilisée pour comparer les moyennes (Duncan, 1955). De même, des régressions multiples et le programme d'ajustement des courbes "Curvefit" ont été utilisés. Ce dernier programme offre 25 modèles mathématiques.

### ***Evaluation économiques***

Les évaluations économiques ont été faites sur la base des productions obtenues dans les expérimentations 1 et 3 afin de déterminer la faisabilité économique de l'utilisation de la technique de fertigation goutte à goutte N-K et des différentes doses d'azote et de potassium sur la tomate dans les conditions de Cuba. Pour ce faire, les rendements commerciales\* (fruits de première et deuxième classes) ont été considérés comme données primaires.

Les coûts des activités communes et non communes aux différents traitements ont été relevés dans la Fiche Technologique confectionnée par le MINAGRI en 1990 pour cette culture dans des conditions similaires.

Les coûts de revient des matériels employés dans le système d'irrigation goutte à goutte, la fertigation et l'irrigation par aspersion ont été relevés du Formulaire pour la présentation et l'approbation de nouveaux prix (Cuba, 1988). Quant aux coûts des installations, ils ont été déterminés à partir des calculs hydrauliques réalisés.

Le prix des engrais urée, superphosphate triple et chlorure de potassium ainsi que ceux de la tomate ont été relevés dans la résolution 140 du Comité d'Etat pour les Prix (Cuba, 1996).

A partir de ces informations, les indicateurs ci-après ont été déterminés :

- Coût de la production
- Valeur de la production
- Coût par "peso" produit (le peso est la monnaie cubaine)
- Bénéfice
- Rentabilité

## Résultats et discussion

### ***Comparaison du comportement de la tomate variété Floradel et Campbell-28 sous différentes techniques d'irrigation et de fertilisation***

#### **Essai 1 : « Etude du comportement de la tomate variété Floradel sous la fertigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion en conditions semi-contrôlées »**

Le tableau 7 présente les valeurs de la hauteur des plantes, le diamètre des tiges et le nombre de feuilles par plante. On n'y observe que les plantes cultivées sous fertigation ont eu un développement végétatif meilleur. La différence entre la hauteur des plantes, le diamètre des tiges et le nombre de feuilles par plante sous fertigation est hautement significatif en comparaison avec l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. Ces résultats coïncident avec ceux publiés par les auteurs comme Sweeney et al. (1987) et Bhella (1988).

**Tableau 7** : Influence des différentes techniques sur la croissance végétative de la tomate variété Floradel 90 jours après la germination

Traitement	Hauteur (cm)	Diamètre de la tige (mm)	Feuilles Nbre/plant
RA + F	66,6	10,7	16
FR	71,6	11,7	17
E.S.X	1,3***	0,2***	0,2***

Le comportement des rendements et leurs composants qui sont présentés dans le tableau 8, montrent que la fertigation goutte à goutte a eu une influence hautement positive sur la production des plantes. Les rendements obtenus sous la fertigation goutte à goutte ont dépassé de 63,67% ceux obtenus sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais.

Le poids moyen et le nombre de fruits par plante ont accru de façon significative avec l'utilisation combinée de l'eau et des engrais à haute fréquence et de façon localisée. Des résultats similaires ont été reportés par Locascio et Smajstrla (1989) entre autres.

**Tableau 8** : Influence de la fertigation goutte à goutte et de l'irrigation par aspersion avec application manuelle des engrais sur le rendement et ses composantes

Traitement	Rendement (t/ha)	Poids moyen (g)	Nbre de fruits/plant
RA + F	12,94	83,01	5
FR	21,18	103,94	6
E.S.X	0,82***	3,55***	0,2***

Les accroissements enregistrés aussi bien au niveau du développement végétatif des plants que des rendements et leurs composantes sous la fertigation goutte à goutte, sont dus aux caractéristiques de cette d'irrigation et de fertilisation et à ses effets sur la croissance et le développement des plantes. Ceci se doit également aux effets de cette technique sur la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. Une discussion plus approfondie de ces explications est faite dans le prochain chapitre.

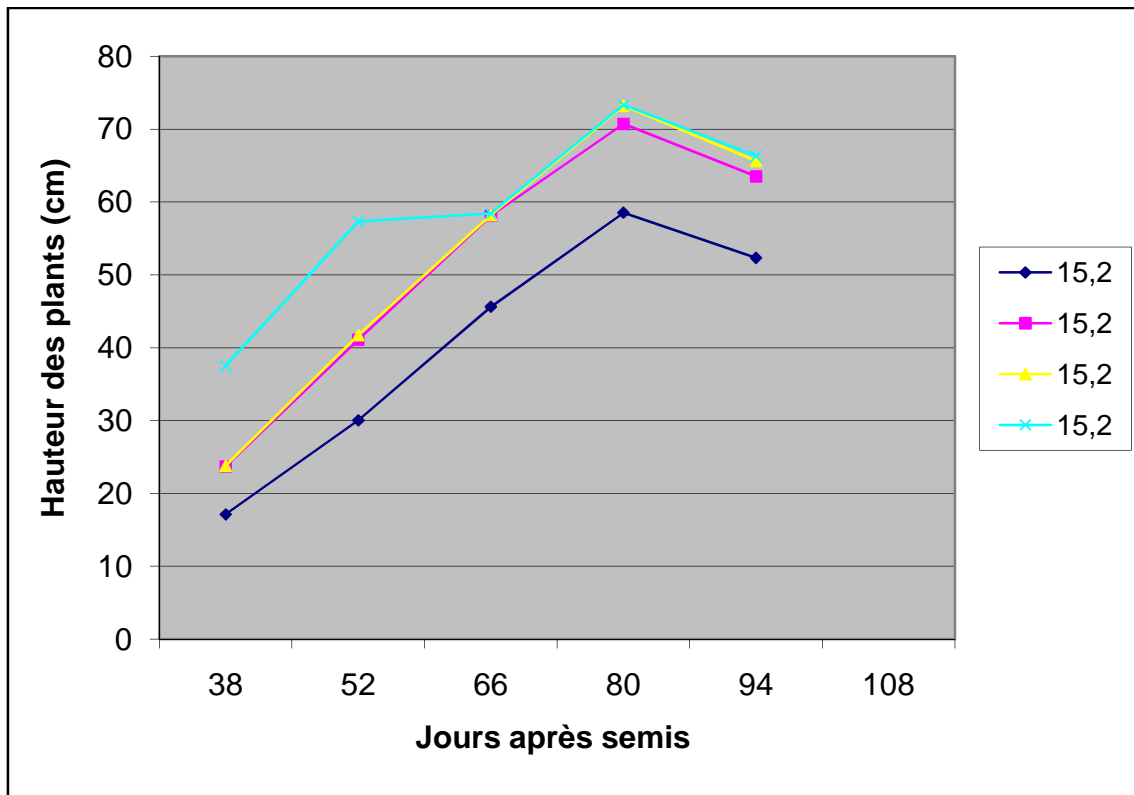
**Expérimentation 1 : « Etude du comportement de la tomate variété Campbell-28 sous différentes techniques d'irrigation et de fertilisation en plein champ »**

**Croissance des plantes**

La figure 1 montre la dynamique de la croissance des plantes sous les différents traitements. On n'y observe que la hauteur des plants à 38 jours après le semis est la même partout. Ceci témoigne de l'homogénéité des échantillons étudiés. Déjà 14 jours après l'application des traitements, il est noté une différence marquée au niveau du comportement des plants. Cette différence s'est maintenue jusqu'au 80<sup>ème</sup> jour après le semis. Les plants sous fertigation goutte à goutte ont présenté la meilleure croissance.

Du fait que cette période correspond à l'initiation de la fructification, il est à espérer que la meilleure croissance présentée par les plants sous fertigation goutte à goutte entraîne une certaine influence sur la production. Aussi, cette technique a-t-elle un effet positif sur l'intensité de l'activité d'assimilation des nutriments par les plantes.

Le point culminant de différenciation au niveau de la hauteur des plants entre les traitements a correspondu à 66 jours après le semis avec des valeurs de 33,6 cm pour l'irrigation par aspersion avec application manuelle des engrais contre 54,62 cm pour la fertigation goutte à goutte.

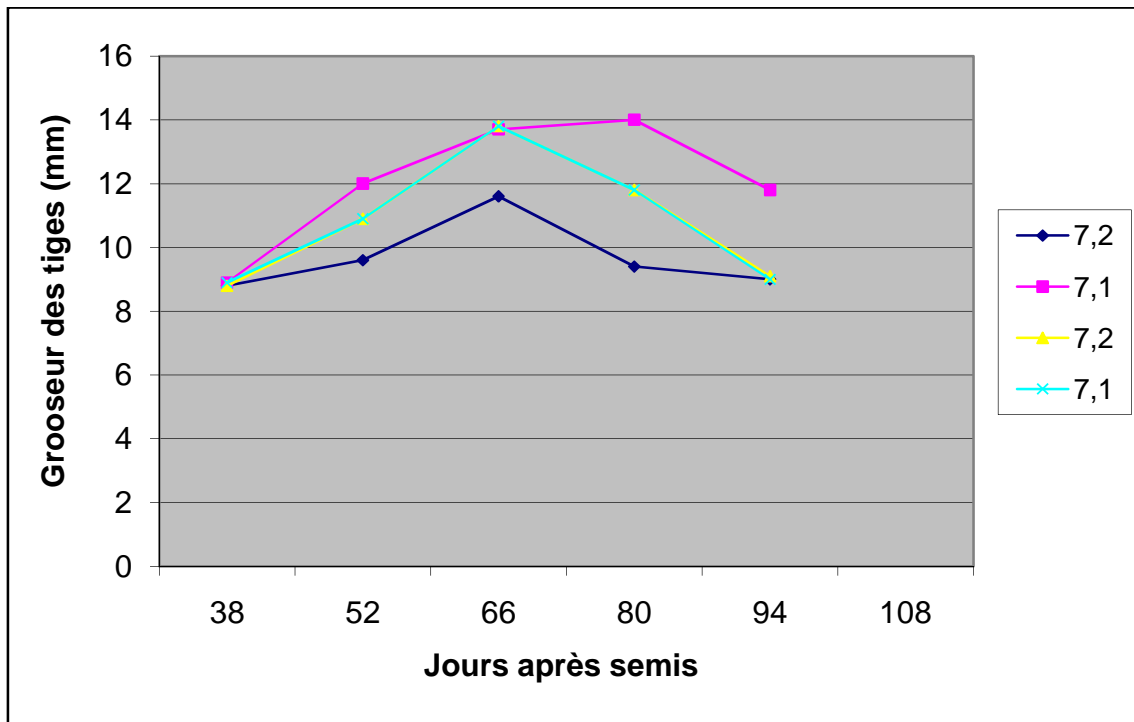


**Figure 1 : Dynamique de la croissance des plantes**

A partir des 80 jours après le semis, les valeurs de la hauteur des plantes n'ont pas présenté de grandes différences à l'exception du traitement où l'azote et le potassium n'ont pas été appliqués. Tout ce qui précède démontre que l'effet principal de la hauteur goutte à goutte, par rapport à l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais, a été d'anticiper la croissance des plantes. Cette conclusion correspond bien avec celle émise par Bhella (1988).

Tout au long de l'étude, les plantes cultivées sous irrigation par aspersion sans apport d'azote ni de potassium ont présenté les valeurs de hauteur des plantes les plus faibles. Ce résultat démontre l'importance de ces éléments nutritifs pour une bonne croissance des plantes dans les conditions de l'étude.





**Figure 2 : Dynamique de la croissance des tiges**

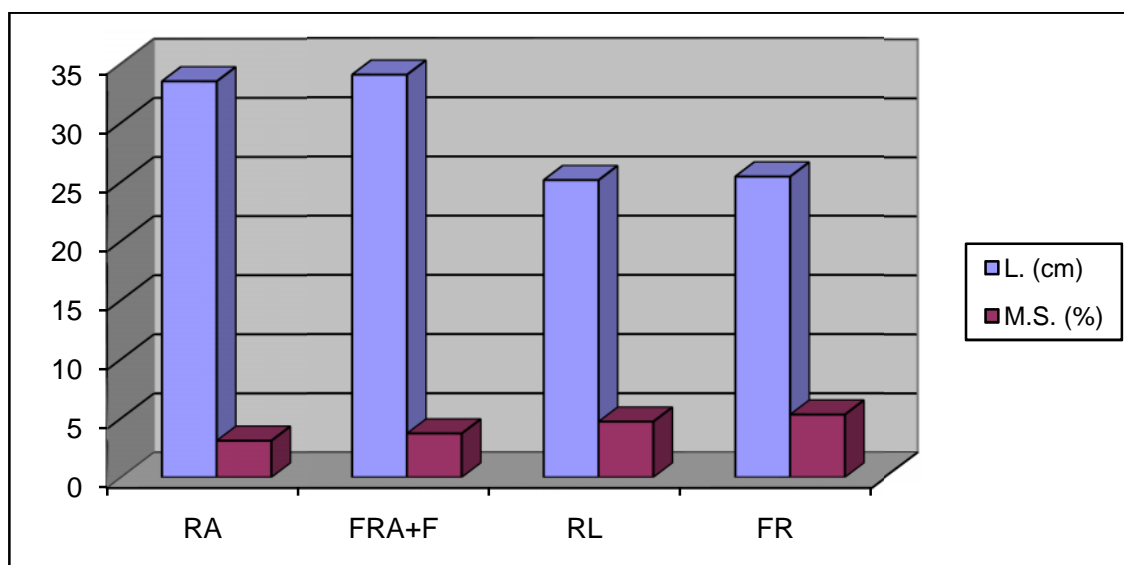
En ce qui concerne le diamètre des tiges (figure 2), on peut apprécier que les plantes sous fertigation goutte à goutte ont atteint les 10 mm beaucoup plus rapidement que les plantes cultivées sous les autres traitements. On remarque également que le grossissement des tiges a ralenti. Ce comportement peut être qualifié de normal car selon Papadopoulos (1991), les plantes de tomate dont le diamètre des tiges atteint 10 mm à l'initiation de la floraison et qui maintiennent la grosseur desdites tiges autour de cette valeur sont les plus productives.

Il faut signaler que les plantes cultivées sous irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais ont présenté le plus lent grossissement des plantes avec des valeurs en dessous des autres tout au long de l'expérimentation.

La figure 3 présente la longueur de la racine principale (L) et la matière sèche (m.s.) du système racinaire plantes sous les différents traitements. L'analyse de variance a révélé l'existence de différences hautement significatives entre les valeurs de la longueur des racines principales des plantes cultivées sous les systèmes d'irrigation par aspersion (irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais N-P-K et sans azote ni potassium) d'une part puis celles des plantes sous irrigation goutte à goutte (fertigation goutte à goutte et irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais) d'autre part. Les valeurs sous le premier groupe de système d'irrigation sont supérieures à

celles du second groupe. Ceci s'explique par le fait que la croissance du système racinaire des plantes est directement affectée par la présence d'eau et des éléments nutritifs (Drew, 1975). Lorsque le déplacement des nutriments vers le système racinaire de la plante est faible, celle-ci développe ses racines à la rencontre desdits nutriments (Bosc et Maertens, 1981).

Il est certain que la longueur des racines d'une plante dépend des facteurs génétiques et des facteurs environnementaux dont la disponibilité en eau et en nutriments. La longueur des racines est d'autant plus grande que la disponibilité d'eau et de nutriments est plus faible (Habib, 1986).



**Figure 3 : Effet des différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur la longueur de racines principales et l'accumulation de matière sèche dans les racines**

On observe dans cette même figure qu'en revanche, la matière sèche du système racinaire des plantes cultivées sous fertigation goutte à goutte ont présenté les valeurs les plus élevées (plus d'une fois et demi de la matière sèche obtenue avec l'utilisation de l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais). Ce fait s'explique par la localisation de l'eau et des engrais dans les environs immédiats des racines desdites racines dans le bulbe humide du sol.

D'après Athinson (1981), les propriétés mécaniques du sol (cohésion et angle de friction) déterminent en grande mesure la densité racinaire des plantes. Pour une texture donnée, les valeurs de ces caractéristiques mécaniques diminuent lorsque l'humidité augmente.

Il est important d'indiquer l'accroissement de la matière sèche du système racinaire des plantes sous fertigation goutte à goutte s'est traduit par une augmentation considérable de la superficie absorbante. Une bonne densité racinaire est importante car, selon Carpena (1986), la vitesse d'absorption de l'eau et portant des nutriments par la plante est d'autant plus élevée que la superficie absorbante est grande.

Le résultat antérieur permet de supposer que dans des conditions de sol similaires, l'absorption des nutriments devrait être plus grande fertigation goutte à goutte que sous les autres systèmes d'irrigation et de fertilisation.

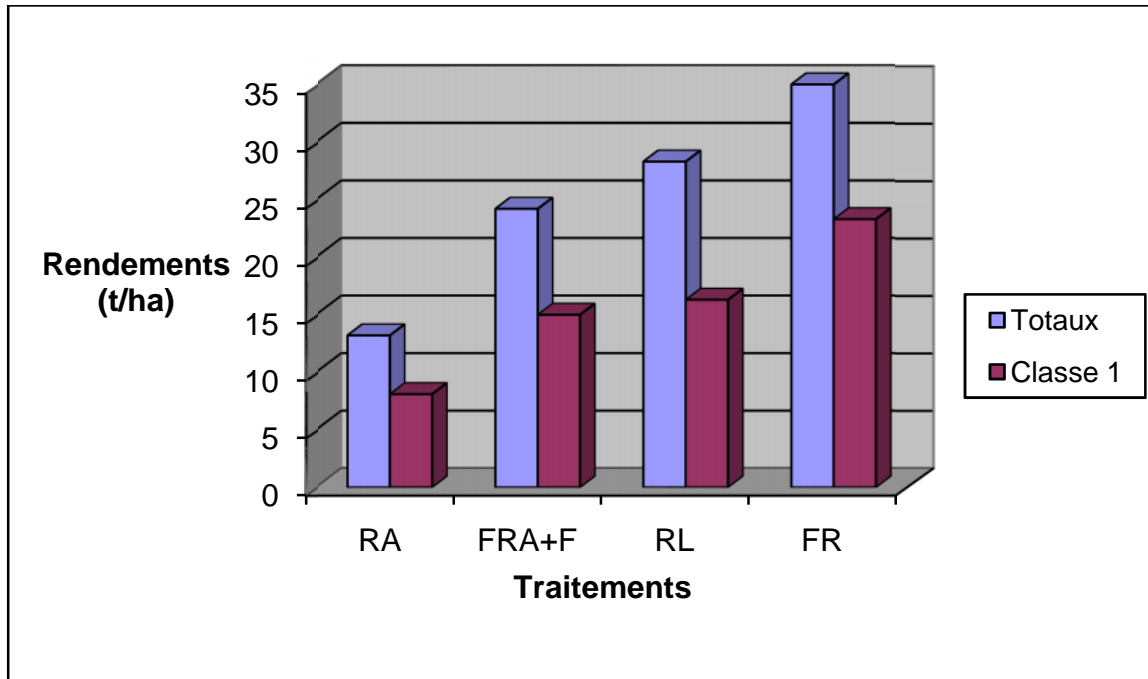
Par ailleurs, il a été observé que la matière sèche du système racinaire obtenue sous irrigation goutte à goutte avec l'application manuelle des engrais. Ceci démontre bien le rôle prépondérant que joue l'humidité du sol sur le développement de la superficie absorbante des racines des plantes et, partout, sur la nutrition des cultures.

### **Rendement, ses composantes et la qualité interne des fruits**

Les rendements obtenus au niveau des plantes soumises aux différents traitements ainsi que les rendements des fruits dont le diamètre équatorial dépasse 6 cm (fruits de première classe) sont présentés dans la figure 4. On peut y constater que la valeur de rendement la plus élevée a été obtenue sous fertigation goutte à goutte. Cette valeur dépasse de plus de 12 t/ha (62%) le rendement obtenu sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. Cette augmentation notable des rendements peut s'expliquer par certains avantages qu'offre la fertigation goutte à goutte. En effet, ledit système accroît l'efficacité des engrais du fait qu'il permet d'obtenir la concentration de nutriments la plus élevée et la plus constante à travers la localisation de toute la quantité d'engrais apportée dans les environs immédiats des racines actives des plantes (Bakker, Slangen et Glas, 1984). Ce fait est également dû au fait que la distribution desdits engrais est plus homogène (Ramos, Castell et Gomez, 1987).

La haute fréquence de la fertigation goutte à goutte permet de maintenir un niveau d'humidité optimal dans le bulbe humide du sol. Ceci entraîne une faible tension d'eau dans le bulbe. Les conditions, ainsi créées, réduisent les besoins en énergie des plantes pour absorber l'eau et les nutriments (Goldberg, Gormat et Rincon, 1976 ; Bucks, Nakayama et Warrich, 1982). Elles induisent aussi des dissociations et des activités racinaires plus intenses (Bakker, Slangen et Glas, 1984).

Les aspects ainsi décrits, unis à une masse racinaire plus élevée impliquant une superficie absorbante plus grande, permettent l'accroissement des rendements des cultures sous fertigation goutte à goutte.



**Figure 4 : Rendements totaux et rendements de première classe**

Les résultats précédents corroborent supériorité de la technique de fertigation goutte à goutte sur celle d'irrigation par aspersion avec l'application manuelle d'engrais. Cette supériorité démontrée est relative à la croissance des plantes, à leur développement et à leur production. Lesdits résultats démontrent, par ailleurs, l'applicabilité de cette technique sur des sols et dans des conditions similaires à ceux de présente étude.

Des auteurs comme Serrano (1987) ; Ramos, Castell et Gomez (1987) ainsi que Madrid (1991), ont rapporté des résultats similaires dans des conditions diverses de climat et de sol et sur différentes cultures.

La différence de près de 5 t/ha (25% du rendement sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais) obtenue avec l'utilisation de l'irrigation goutte à goutte à haute fréquence et application manuelle d'engrais N-K, démontre l'important rôle que joue le fait de maintenir le sol constamment humide dans l'absorption des nutriments par les cultures. Ce résultat coïncide avec celui rapporté par Bhella (1988) et Singh, Singh et Bhangari (1989).

Il est important de souligner que les rendements de tomate obtenus sous fertigation goutte à goutte sont supérieurs de 30% à ceux obtenus sous irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais. Ceci démontre que la meilleure réponse de la culture de tomate à l'irrigation goutte à goutte, ou en d'autres termes, la meilleure efficacité du système d'irrigation goutte à goutte, sont obtenues avec l'utilisation combinée de l'eau et des engrais. Ce constat confirme la théorie de Fernandez et Borges (1987), selon laquelle les résultats les plus prometteurs sont obtenus en incluant les engrais dans l'eau d'irrigation et en répartissant la totalité des engrais en de petites quantités périodiques.

Les valeurs de rendement des fruits de première classe qui apparaissent dans la figure 5, citée antérieurement, montrent des différences hautement significatives entre les divers traitements. On peut y observer que la technique de fertigation goutte à goutte a permis d'accroître les rendements des fruits de première classe de 53% par rapport à l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. Ce résultat coïncide avec ceux publiés par Bar-Yosef et Sagiv (1982) puis Locascio et Smajstrla (1989). Ces auteurs ont signalé des accroissements de l'ordre de 50% et 66% respectivement. Les plus faibles rendements ont été obtenus, comme on devrait s'y attendre, sous les traitements n'ayant reçu ni l'azote ni le potassium. Ceci réitère la nécessité d'apporter lesdits éléments afin d'obtenir des rendements significatifs dans les sols présentant les caractéristiques à celles de l'étude.

Le tableau 9 montre les poids moyens et le nombre de fruits par plante. On y observe qu'il n'y a pas de différences significatives entre les poids moyens des fruits sous fertigation goutte à goutte et sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. Ce résultat amène à affirmer que, dans les conditions de l'étude, fertigation goutte à goutte n'a pas eu d'effet sur cette composante du rendement.

En ce qui concerne le nombre de fruits, les valeurs obtenues sous fertigation goutte à goutte sont largement supérieures à celles obtenues dans tous les autres traitements. Ces résultats démontrent que l'effet positif de la technique de fertigation goutte à goutte sur les rendements est essentiellement dû à son effet sur le nombre de fruits.

Bien que la différence entre les poids des fruits ne soit pas statistiquement significative, on remarque que les fruits les plus petits sont obtenus sous le traitement n'ayant apporté ni l'azote ni le potassium. C'est également avec ce traitement que le nombre de fruits par plante le plus faible a été obtenu. Ces résultats confirment, une fois encore, le

rôle décisif que jouent l'azote et le potassium dans les composantes du rendement de la tomate (Gros, 1966).

**Tableau 9** : Effet des différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur le poids moyen des fruits et le nombre de fruits par plante

Traitement	Rendement (t/ha)	Poids moyen (g)
FR	133.12 b	10.14 b
RL + F	141.31 a	7.26 b
RA + F	134.74 b	6.18 c
RA	129.11 c	2.86 d
E.S.X	1.076***	0,025 ***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

Les différentes techniques d'irrigation et de fertilisation (tableau 10) n'ont pas eu d'influences significatives sur l'acidité et la matière sèche des fruits. Il est intéressant de faire ressortir la non existence de différences significatives entre les valeurs de matière sèche malgré que sous fertigation goutte à goutte, le nombre de fruits par plant ait dépassé en plus de 50% celui obtenu avec l'utilisation de l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais.

**Tableau 10** : Effet des différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur la qualité interne des fruits

Traitement	m.s. (%)	S.S.T (%)	Acidité %
FR	4.16	3.95 ab	0.50
RL + F	4.33	3.85 b	0.48
RA + F	4.50	4.10 a	0.44
RA	4.75	4.20 a	0.39
E.S.X	0.185 n.s.	0.076 x	0.29 n.s.

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

Le pourcentage de solides solubles totaux bas a été obtenu sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. En ce qui concerne les autres traitements, les différences constatées au niveau de cet indicateur ne sont pas significatives. Ce dernier constat coïncide avec celui rapporté par Keng *et al.* (1979).

### **Evaluation comparative de l'enherbement**

Le tableau 11 montre l'incidence des mauvaises herbes sur les parcelles sous les divers traitements. On y observe que les parcelles sous irrigation goutte à goutte ont présenté un pourcentage de couverture par les mauvaises herbes inférieur à celui des parcelles sous irrigation par aspersion. Les valeurs du degré d'enherbement sont similaires. Quant au nombre d'espèces de mauvaises herbes par mètre carré, il a été inférieur sous irrigation goutte à goutte par rapport à l'irrigation par aspersion. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait qu'avec l'utilisation de l'irrigation goutte à goutte, une partie seulement du sol est mouillée. Les incidences des mauvaises herbes sont, par conséquent, enregistrées en grande partie sur les portions de sol humide car les portions sèches ne présentent pas des conditions propices pour leur émergence et développement.

**Tableau 11** : Evaluation du comportement des mauvaises herbes

Indicateur	Traitement			
	FR	RL + F	RA + F	RA
Couverture	20	20	75	70
Degré d'enherbement *	2	3	4	4
Quantité d'espèces / m <sup>2</sup>	7	10	28	20
Monocotylédones **	26	34	132	108
Dicotylédones **	16	18	36	42

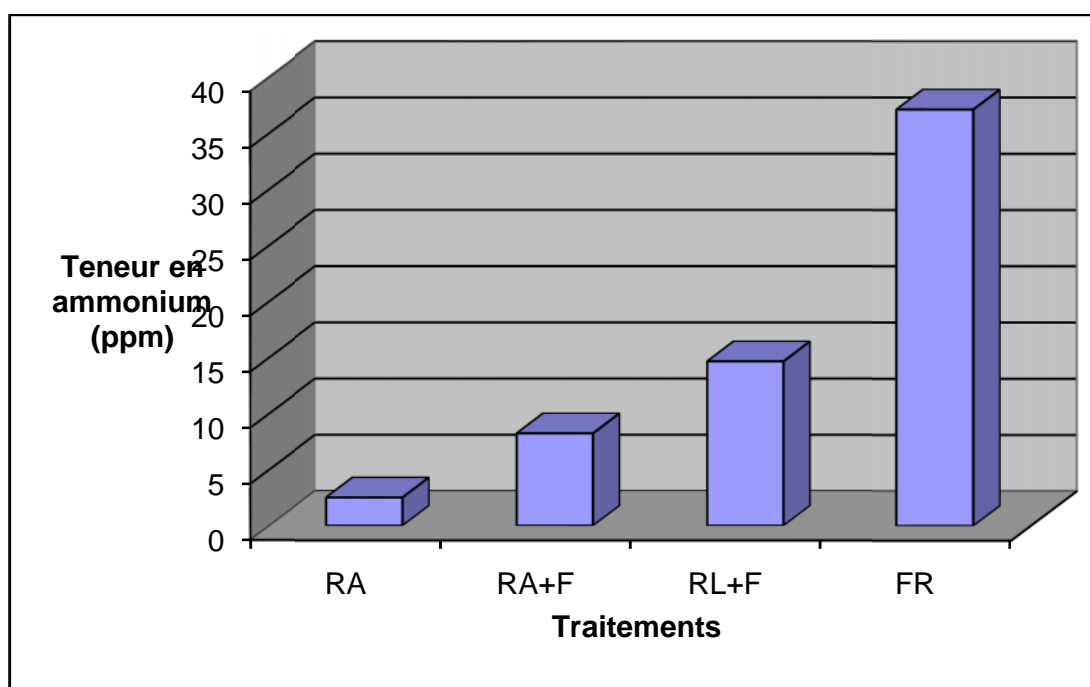
\* : 1= faible ; 2 = moyen ; 3 = élevé ; 4 = très élevé ; \*\* : Quantités totales

Le nombre de monocotylédones a été, de manière générale, trois fois plus élevé sous irrigation par aspersion par rapport à l'irrigation goutte à goutte. Quant aux dicotylédones, leur nombre sous irrigation par aspersion est environ le double de celui sous irrigation goutte à goutte. Dans tous les traitements, les espèces prédominantes

ont été *Cyperus rotundus* L. chez les monocotylédones et *Amarantus dubius* Mat. chez les dicotylédones. Les résultats antérieurs indiquent—que les besoins en opérations de sarclage ou lutte chimique/biologique contre les mauvaises herbes sont plus grands sous irrigation par aspersion que sous irrigation goutte à goutte. Ceci implique une réduction du coût des activités de contrôle des mauvaises herbes sous irrigation goutte à goutte comparativement à l'irrigation par aspersion.

**Influence des différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur la teneur en ions nitrates et ammonium dans le sol (0-20 cm de profondeur) 75 jours après le semis**

La figure 5 montre l'effet des techniques d'irrigation et de fertilisation sur les formes et les teneurs de l'azote minéral dans le sol (0-0,20 m de profondeur). On observe dans la figure 5 a que la teneur du sol en  $\text{NH}_4^+$  est plus élevée sous fertigation goutte à goutte par rapport à l'irrigation goutte à goutte par rapport avec application manuelle d'engrais (plus de 170%).



**Figure 5 a : Effet des techniques d'irrigation et fertilisation sur les teneurs d'ammonium dans le sol à 75 jours après le semis**

Ce fait peut s'expliquer par fait que sous la fertigation goutte à goutte, de petites quantités d'engrais sont périodiquement apportées à la rhizosphère des plantes où les

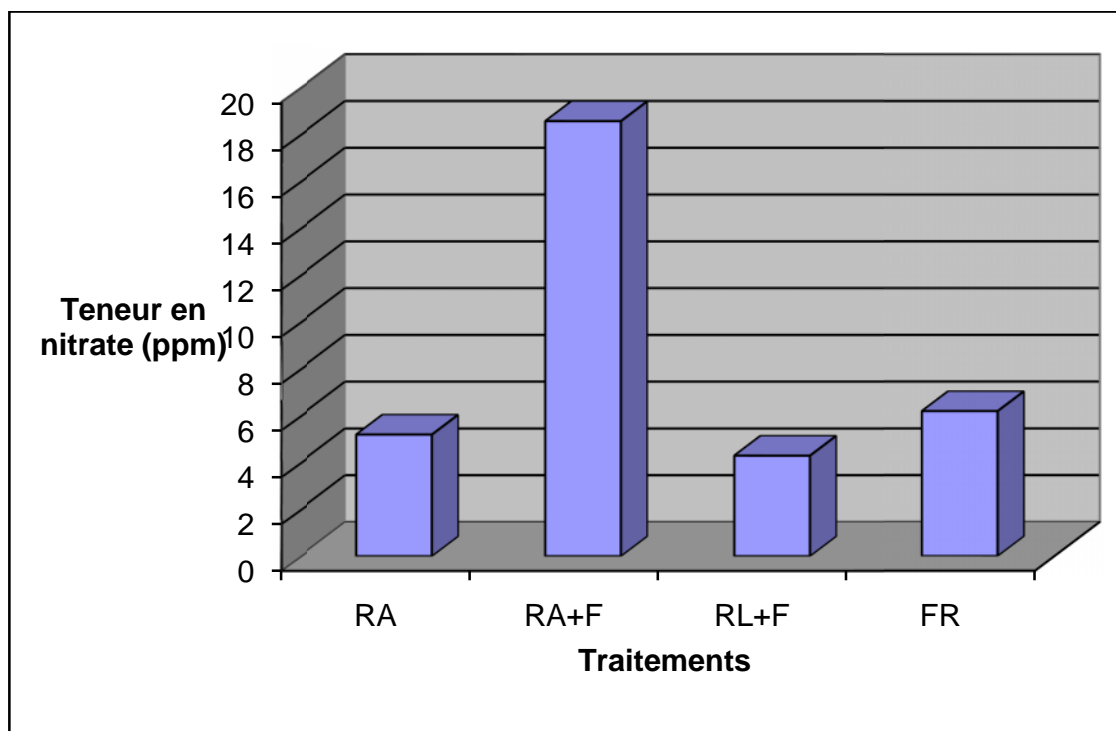


échantillons ayant servi à l'analyse du sol ont été prélevés ; tandis que sous l'irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais, la quantité d'engrais a été répartie sur la superficie expérimentale en forme de bandes.

De la même figure, on apprécie que les teneurs en ions ammonium du bulbe humide du sol sous l'irrigation goutte à goutte avec l'application manuelle d'engrais sont supérieures à celles obtenues avec l'utilisation de l'irrigation par aspersion. Si l'on tient compte du fait que les quantités d'engrais apportées sont identiques, que la forme d'application desdits engrais est également identique et que seuls le type de l'irrigation et sa fréquence ont varié, l'on en déduit l'effet de l'humidité constante du sol sur les formes de l'azote minéral. D'après Laher et Avnimelech (1980), sous l'irrigation goutte à goutte à haute fréquence, les conditions de nitrification sont défavorables. Ces mêmes auteurs précisent que l'on observe un accroissement de la teneur en  $\text{NH}_4^+$  du bulbe humide du sol notamment dans les environs immédiats des émetteurs d'eau. Ce fait est dû à la grande sensibilité du processus de nitrification aux conditions anaérobiques, les bactéries responsables dudit processus étant fondamentalement aérobiques.

La comparaison entre les teneurs en ions ammonium montre que sous la fertigation goutte à goutte, on note une augmentation de 350% par rapport à l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. Willis, Davies et Graetz (1991), à la suite d'études similaires sur les agrumes à l'Université de la Floride (Etats-Unis d'Amérique), ont publié des résultats identiques pour des profondeurs de 0 à 15 cm.

Le fait que l'azote minéral du sol soit de façon prédominante sous forme ammoniacal est très bénéfique pour limiter les pertes par lessivage. Rivera et Eolia Treto (1989), ont montré que les pertes d'azote dans le sol sont essentiellement liées aux mouvements des nitrates du fait que leur grande solubilité. Ces auteurs ont en outre indiqué que les pertes d'azote dépendent également, entre autres facteurs, du type de sol et du rythme d'absorption de l'azote par cultures. Il faut ajouter que l'ion ammonium est facilement adhérent au sol. Dans la figure 5b, par contre, on observe que la teneur d'ions nitrates dans le sol sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais est supérieure (presque 4 fois) à celle obtenue sous irrigation goutte à goutte. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que dans les conditions des sols Ferrallitiques rouges, la nitrification peut être intense. Rivera et Eolia Treto (1989) et Rivera (1992), ont rapporté à propos qu'environ 600 kg/ha d'azote sous forme d'urée se sont nitrifiés complètement en une semaine.



**Figure 5 b : Effet des techniques d'irrigation et fertilisation sur les teneurs de nitrates dans le sol à 75 jours après le semé**

Les teneurs totales du bulbe humide du sol en azote facilement assimilable par les plantes (ammonium et nitrate) sous fertigation goutte à goutte sont supérieures à celles obtenues dans les autres traitements. Ceci prouve que la combinaison de l'eau et des engrais dans les systèmes d'irrigation de l'eau et des engrais dans les systèmes d'irrigation localisée garantit la meilleure disponibilité d'azote aux cultures.

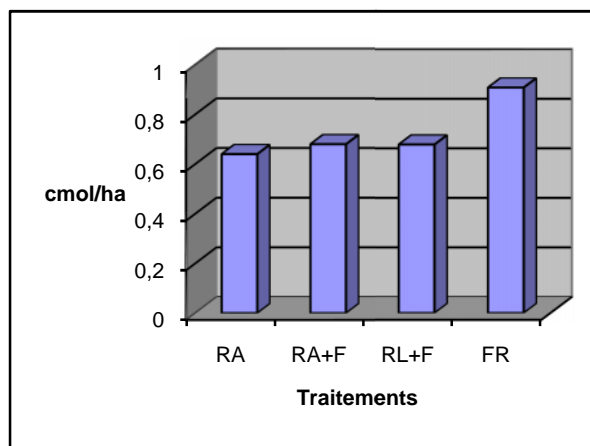
### **Mobilité des éléments potassium et phosphore dans le sol sous les différentes techniques d'irrigation et fertilisation**

La figure 6 montre des variations notables dans la distribution à travers le profil du sol, du potassium échangeable. Entre 0 et 20 cm de profondeur, les teneurs en cet élément du bulbe humide du sol sous fertigation goutte à goutte sont supérieures à celles enregistrées sous les autres traitements et en particulier les systèmes d'irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais. Par ailleurs, on observe une diminution de la teneur en potassium échangeable à 105 jours après le semis sous tous les traitements à l'exception de la fertigation goutte à goutte. Sous ce dernier traitement, on observe même une légère augmentation de la teneur en potassium échangeable par rapport à la valeur obtenue 75 jours après le semis. Ce résultat, qui coïncide avec celui

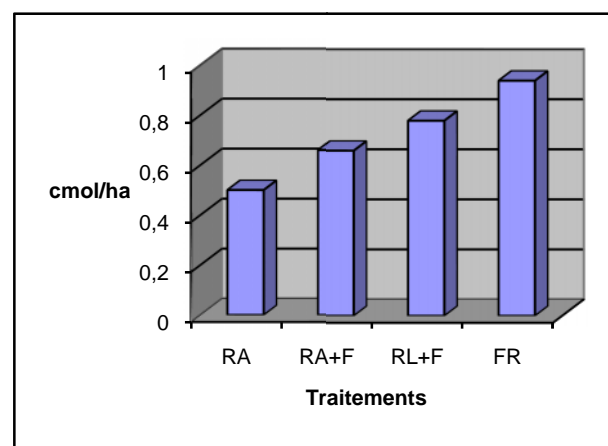
publié par Neilsen, Hoyt et Neilsen (1995), peut s'expliquer par le fait qu'avec la fertigation goutte à goutte, l'apport du potassium au sol est fréquent.

Le résultat antérieur prouve que le potassium échangeable est plus disponible aux cultures sous fertigation goutte à goutte et explique fort bien la meilleure croissance et les meilleurs rendements des cultures sous cette technique.

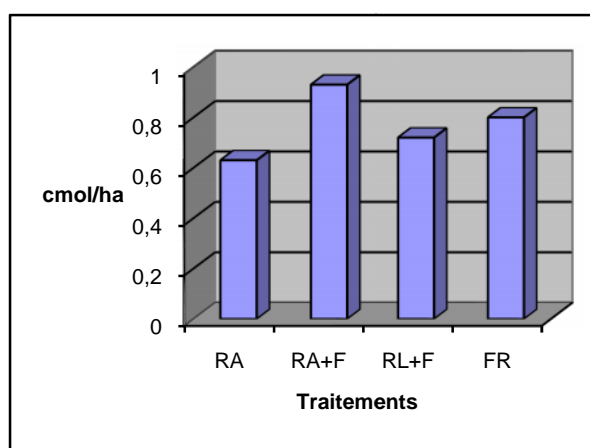
La comparaison entre les résultats obtenus sous irrigation goutte à goutte d'une part et l'irrigation par aspersion d'autre part, avec application manuelle d'engrais dans les deux cas, montre que les teneurs en potassium échangeable sont identiques à 75 jours après le semis. Mais à 105 jours après le semis, on note une diminution dans la teneur en cet élément sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. Par contre sous irrigation goutte à goutte avec application d'engrais, on note que les valeurs sont constantes. Ce résultat peut s'expliquer par le fait du lessivage vers les couches profondes du sol, du potassium échangeable sous irrigation par aspersion.



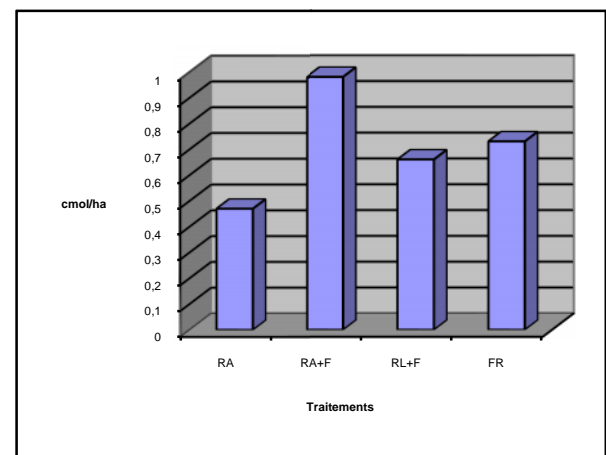
**0 – 20 cm à 75 jas**



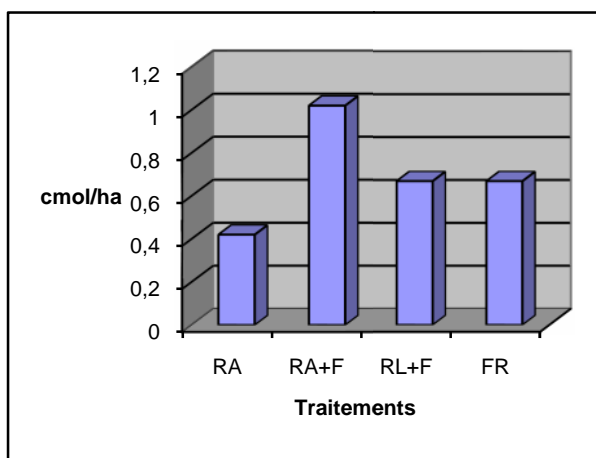
**0 – 20 cm à 106 jas**



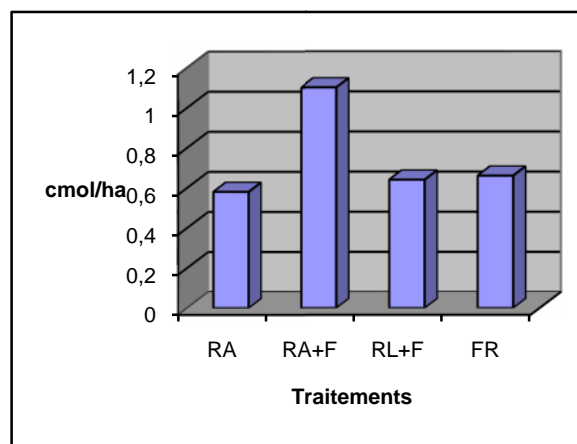
**20 – 40 cm à 75 jas**



**20 – 40 cm à 106 jas**



40 – 60 cm à 75 jas



40 – 60 cm à 106 jas

**Figure 6 : Effet des techniques d'irrigation et fertilisation sur les teneurs en K du sol**

*Légende : jas = jours après le semis*

L'explication antérieure est d'autant plus plausible qu'entre 20 et 40 cm puis entre 60 et 60 cm de profondeur, aussi bien à 75 qu'à 105 jours après le semis, les teneurs en potassium échangeable sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais sont plus élevées que celles sous irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais. Il faut signaler que la mobilité du potassium échangeable grâce à l'eau de drainage est plus grande dans les sols Ferrallitiques rouges. A cet propos, Cairo et Quintero (1980) ; Izquierdo et al. (1991) et d'autres chercheurs affirment que les argiles qui prédominent dans ces types de sol sont de rapport 1 :1. Lesdites argiles appartiennent au groupe des Kaolinites. D'après Fundora, Arzola et Machado (1983), des facteurs tels que la capacité d'échange totale réduite, la non existence de substitutions isomorphiques dans le réseau et la non disposition du genre « face à face » des ouvertures hexagonales sur des molécules différentes.

Phillips, Black et Cameron (1988), ont indiqué que lorsque l'équilibre cationique s'établit entre les sites d'adhésion du sol et les ions K<sup>+</sup> échangeables, ces derniers migrent "librement" avec l'eau de drainage.

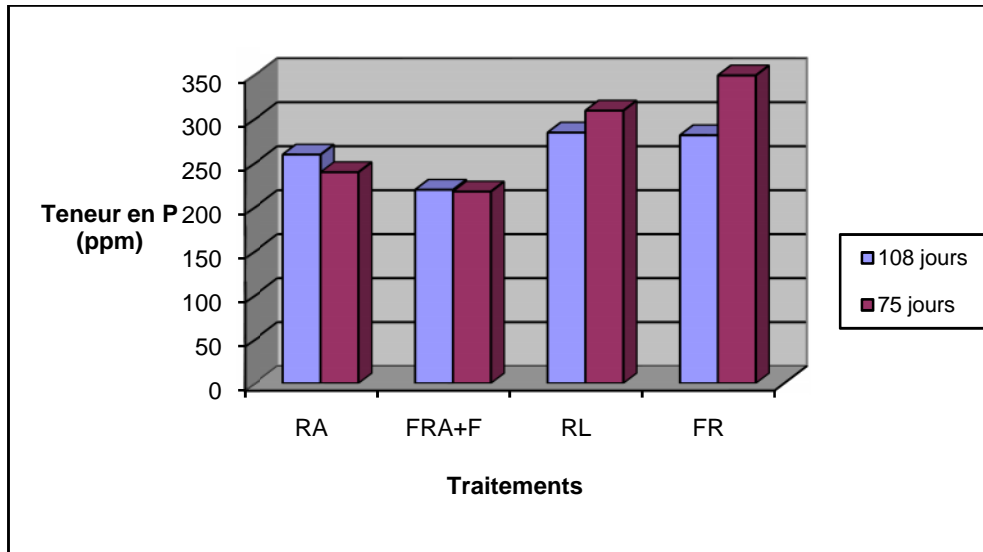
Maria Borroto (1995), dans des expériences avec des colonnes et en champs a observé que les teneurs de potassium dans les profondeurs sol augmentent après de fortes précipitations. Le comportement du phosphore assimilable dans les sols sous les différentes techniques d'irrigation et de fertilisation est illustré dans la figure 7. on y observe qu'entre 0 et 20 cm, les teneurs de phosphore dans le bulbe humide du sol sous irrigation goutte à goutte sont supérieures à celle sous irrigation par aspersion

aussi bien à 75 qu'à 105 jours après le semis. La teneur la plus élevée a été enregistrée sous fertigation goutte à goutte (336, 25 ppm). Ce résultat, qui coïncide avec ceux publiés par Nielsson et Wikhendo (1990) entre autres auteurs, peut s'expliquer par le fait que la majeure partie des processus de libération et re-adhésion du phosphore par le sol a lieu à travers le cycle d'irrigation. Ceci veut dire que la disponibilité du phosphore varie de façon continue le long d'un large intervalle de valeurs d'humidité du sol (Bacon et Davey, 1982).

Fernandez et Borges (1987), ont indiqué que l'accroissement de la disponibilité du phosphore, aussi bien celui qui existait dans le sol que celui apporté par application d'engrais résulte probablement de la réduction des phosphates ferriques à ferreux du fait des conditions anaérobiques dans le bulbe humide du sol durant l'irrigation. Ceci est fortement influencé par la haute fréquence de l'irrigation dans les systèmes d'irrigation localisée.

Par ailleurs, Leckchvii (1983) et Cassagnes, Bazailers et Fourcade (1984), coïncident en affirmant que l'on observe une amélioration dans la migration du phosphore apporté par fertigation localisée vers les zones de concentration des racines absorbantes des cultures. Cet état de chose a pour résultat un accroissement considérable de la disponibilité du phosphore pour les plantes, augmentant du coup les chances de son absorption par celles-ci.

Il faut signaler qu'avec les traitements d'irrigation par aspersion, on note une diminution des teneurs du sol en phosphore assimilable à 105 jours après le semis par rapport aux valeurs enregistrées 75 jours après le semis. Ceci s'explique certainement par l'extraction faite par les plantes d'une part, puis la fixation des phosphates par le sol. Gomez (1987), a signalé que dans les sols ferrallitiques rouge, la fixation des phosphates sur les surfaces actives des argiles et des hydroxydes et de Fe et Al est plus grande.



**Figure 7 : Effet des différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur la teneur en P du sol (0 – 20 cm)**

**Teneurs en azote, phosphore et potassium dans les feuilles à 75 jours après le semis et extractions de ces éléments par les plantes à 105 jours après le semis**

Les teneurs en azote, phosphore et potassium dans les feuilles à 75 jours après le semis ont été fortement influencées par les différentes techniques d'irrigation et fertilisation d'après les données présentées dans le tableau 12. Les teneurs en azote les plus élevées ont été observées sous fertigation goutte à goutte. Il faut signaler que dans ce résultat, l'une des causes les plus importantes a été la plus grande disponibilité de l'azote minéral total dans le bulbe humide du sol. Ces causes a été analysées dans le chapitre 4.1.4.

Les teneurs du sol en azote sous irrigation goutte à goutte d'une part et par aspersion d'autre part avec dans chacun des cas, l'application manuelle d'engrais ont été identiques. Les teneurs les plus faibles ont été obtenues au niveau du traitement sans apport d'azote. En ce qui concerne les teneurs du sol en phosphore, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs obtenues sous fertigation goutte à goutte et sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais et ce malgré la légère supériorité des valeurs obtenues sous fertigation goutte à goutte.

**Tableau 12** : Effet des différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur les teneurs des feuilles en azote, phosphore et potassium à 75 jours après le semis

Traitement	Teneur des feuilles (% m.s.)		
	N	P	K
FR	3,62 a	0,33 a	3,99 a
RL + F	3,07 b	0,29 ab	3,60 b
RA + F	3,18 b	0,26 b	3,23 c
RA	2,18 c	0,27 b	2,58 d
E.S.X	0,04***	0,01***	0,02***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

La légère supériorité des valeurs de la teneur du sol en phosphore sous fertigation goutte à goutte est attendue. En effet, Fardeau, Morel et Boniface (1991), ont rapporté que le facteur le plus important qui limite la nutrition phosphatée des plantes est le flux ; lequel dépend en grande partie de l'humidité du sol. Les auteurs suscités ajoutent que les teneurs en phosphore du sol sous fertigation goutte à goutte soient légèrement supérieures à celles sous irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais au moment où les teneurs sous cette dernière technique sont identiques à celles enregistrées sous irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais.

En général, l'analyse foliaire 75 jours après le semis a permis de cerner de façon adéquate l'état nutritionnel des plantes et les teneurs en azote, en phosphore et en potassium du sol. Les effets des différents traitements sur les extractions d'azote, de phosphore et de potassium 105 jours après le semis ont été hautement significatifs selon le tableau 13. Ainsi, de manière générale, on remarque les extractions du potassium ont été plus grandes que celles des autres éléments. Les extractions de phosphore ont été les plus faibles.

Les quantités d'azote, de phosphore et de potassium extraites par les fruits sont largement supérieures à celles des autres organes des plantes (feuilles, tiges et racines). Ce résultat pourrait s'expliquer par la quantité relative élevée de matière accumulée par les fruits. Ceci prouve les exportations élevées de nutriments avec les récoltes. On en déduit alors la nécessité d'apporter les éléments nutritifs au sol. A propos, Gros (1966), a affirmé que les éléments que les plantes absorbent de l'air sont pratiquement inépuisables tandis que ceux extraits du sol (azote, phosphore et

potassium) sont très limités. De ce fait, les réserves de ces éléments dans le sol s'épuiseraient rapidement avec pour conséquence la diminution des rendements si des restitutions de ces éléments au sol ne sont pas faites.



**Tableau 13** : Effet des différentes techniques d'irrigation et fertilisation sur les extractions (hg/ha) 105 jours après le semis d'éléments nutritifs.

Traitement	Feuilles			Tiges			Racines			Fruits		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
FR	19,47a	1,77 a	21,46 a	9,70 a	1,33 a	17,26 a	4,87 a	0,50 a	5,82 a	63,05 a	8,87 a	57,7 a
RL + F	14,92 b	1,41 b	17,50 b	9,17 ab	0,76 c	14,58 b	3,27 b	0,21 b	0,44 b	44,23 b	5,92 b	43,5b
RA + F	11,18 c	0,91 c	11,35 c	7,55 b	0,51 d	9,22 c	2,09 c	0,2 b	3,16 c	34,10 c	4,28 c	34,28 c
RA	4,99 d	0,61 c	5,31 d	4,18 c	0,86 b	6,44 d	2,72 c	0,28 b	4,21 b	12,03 d	1,16 d	15,25 d
E.S.X	1,2***	0,11 ***	0,98 ***	0,87***	0,03***	0,75 ***	0,31***	0,3***	0,25 ***	1,16***	0,98***	1,15***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)



Les extractions totales d'azote, de phosphore et de potassium sont présentées dans le tableau 14. Les plantes sous fertigation goutte à goutte ont extrait les plus grandes quantités de nutriments. Les valeurs de nutriments extraits par les plantes sous irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais ont été plus élevées que celles des plantes sous irrigation par aspersion. Ces résultats démontrent le rôle décisif de l'humidité du sol dans l'absorption des nutriments par les plantes.

Fardeau, Morel et Boniface (1991), ont indiqué à propos que la présence de l'eau dans le sol doit être privilégiée comme étant un facteur important pour assurer de façon satisfaisante la nutrition des cultures.

**Tableau 14** : Effet des différentes techniques d'irrigation et de fertilisation sur les extractions totales des nutriments par les plantes 105 jours après le semis

Traitement	N	P	K
	(kg/ha)		
FR	97,09 a	12,33 a	101,86 a
RL + F	71,59 b	8,03 b	79,06 b
RA + F	54,92 c	5,90 b	58,01 c
RA	23,92 d	3,46 d	31,81 d
E.S.X	2,03***	1,97***	1,83***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

**Etude comparative de l'efficacité agronomique et du coefficient d'assimilation apparente des nutriments par les plantes sous les différentes techniques d'irrigation et de fertilisation**

L'efficacité agronomique de l'utilisation par les plantes des nutriments apportés à travers ma fertilisation a été plus grande pour l'azote, le phosphore et le potassium sous fertigation goutte à goutte selon le tableau 15. Ce résultat coïncide avec ceux rapportés par des chercheurs comme Hann, Bratts et Kesner (1985).

La nécessité d'apporter les éléments nutritifs à travers le système d'irrigation localisée en vue d'accroître l'efficacité agronomique de l'assimilation des nutriments a été clairement prouvée par la supériorité des valeurs obtenues sous fertigation goutte à

goutte par rapport à celles obtenues sous irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais.

Des résultats identiques ont été obtenus par Pher et Sanders (1976), qui ont démontré que l'application des engrais à haute fréquence à travers l'irrigation localisée a amélioré substantiellement l'efficacité l'utilisation des nutriments par la culture de la pomme de terre par rapport à la fertilisation directe au sol sous le même système d'irrigation.

Par ailleurs, l'irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais a permis d'obtenir des valeurs d'efficacité agronomique supérieures à celles obtenues avec l'irrigation par aspersion, avec application manuelle d'engrais pour les deux systèmes d'irrigation. Tous ces résultats correspondent aux réponses des plantes en ce qui concerne chacun des paramètres étudiés.

L'économie d'engrais du fait de l'utilisation de la fertigation goutte à goutte par rapport à l'irrigation goutte à goutte et l'irrigation par aspersion, toutes deux avec application manuelle d'engrais a été respectivement de 30 et 46% pour l'azote ; 24,38 et 38,61% pour le phosphore puis 23,8 et 53% pour le potassium. Ces valeurs sont dans les intervalles proposés par Médina (1991), Legaz et De Barreda (1981), Bakker, Slangen et Glas (1984) puis Hidmann, Kappler et Bohme (1985)

**Tableau 15** : Efficacité agronomique des différentes techniques d'irrigation et de fertilisation.

Traitement	Efficacité agronomique		
	(kg de fruits) kg d'éléments appliqué		
	N	P	K
FR	117,6	323,2	78,37
RL + F	78,2	244,4	52,3
RA + F	55,2	198,4	36,8
RA	--	88,0	--

Le coefficient d'assimilation apparente des nutriments par les plantes a présenté un comportement similaire à celui de l'efficacité agronomique tableau 16. Ce résultat est évident car les extractions des éléments azotes, phosphore et potassium par les plantes ont eu un comportement identique. Maria Grela (1991), a publié la valeur de

34,93 % comme valeur maximale pour la variété campbell-28 avec l'utilisation de l'irrigation par aspersion et application manuelle d'engrais.

**Tableau 16** : Coefficient d'assimilation apparente des nutriments par les plantes sous les différentes techniques d'irrigation et de fertilisation (C.A.A.).

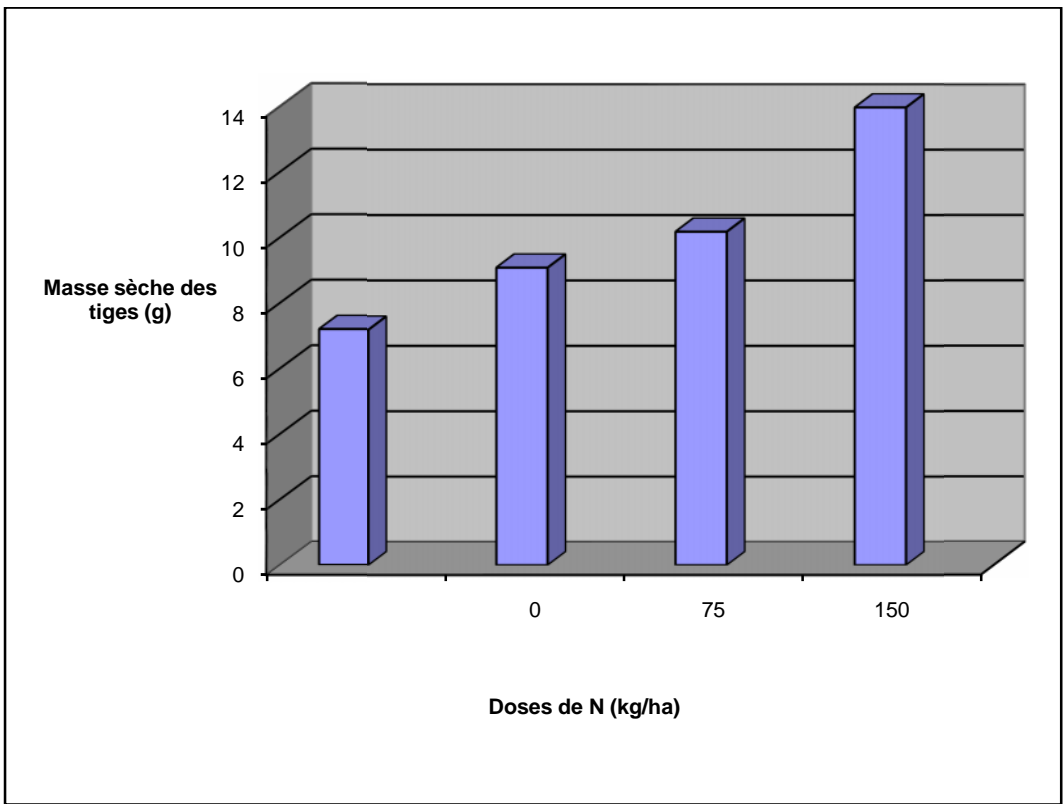
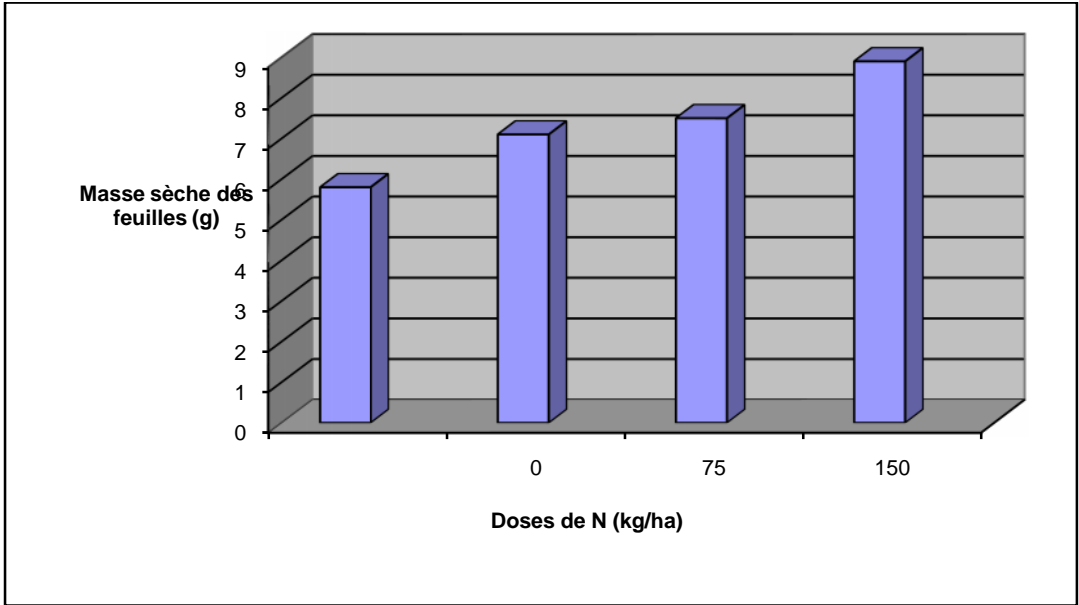
Traitement	C.A.A. (%)		
	N	P	K
FR	48,54	12,47	33,95
RL + F	35,79	8,03	26,35
RA + F	27,46	5,90	19,33
RA	--	3,46	--

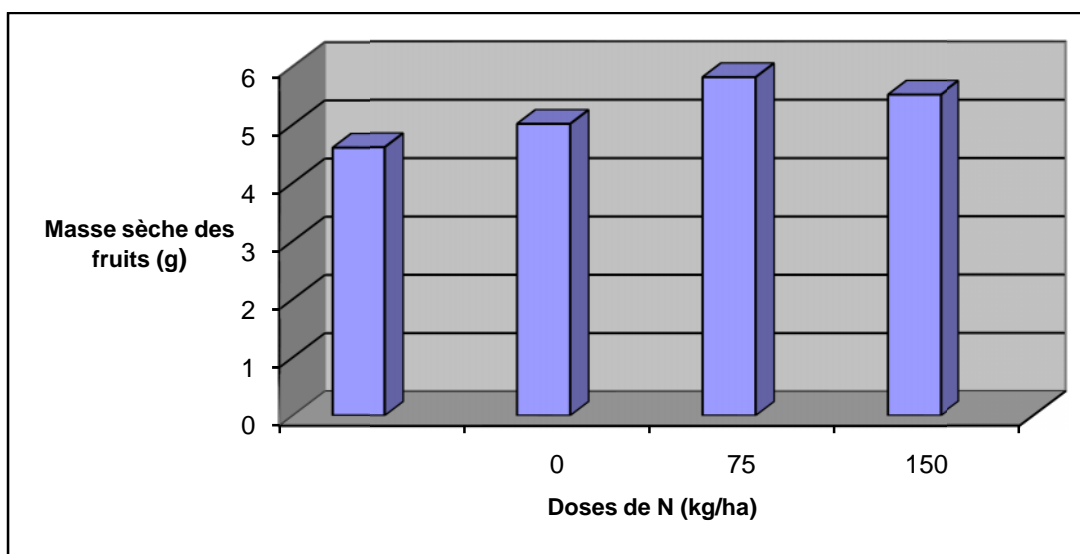
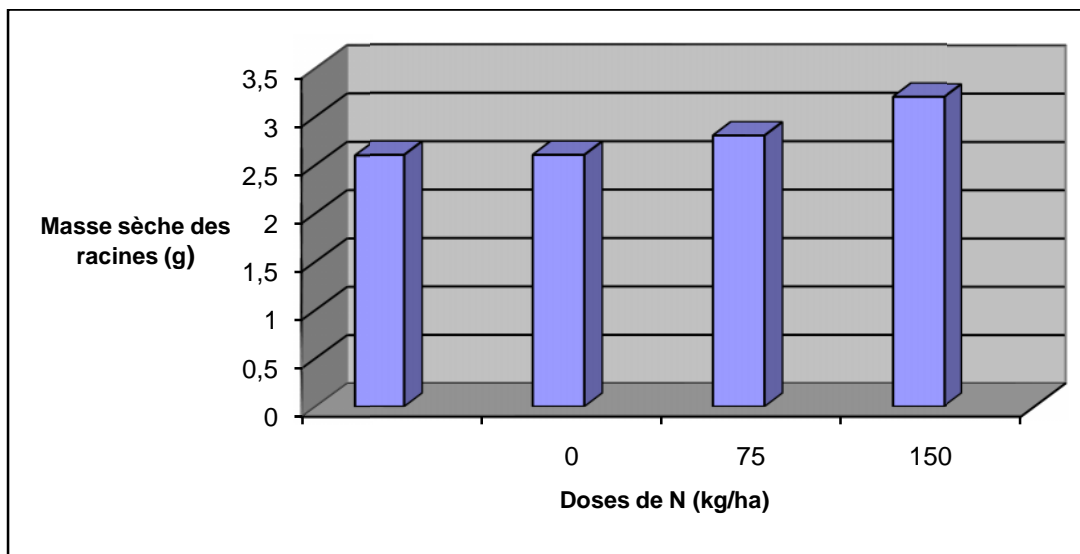
### ***Effet de doses croissantes d'azote***

#### **Essai 2 "Etude du comportement de la tomate variété Campbell-28 sous fertigation azotée sur un substrat sol-matière organique en canaux"**

#### **Effet de doses croissantes d'azote sur l'accumulation de matière sèche par les plantes**

Les données sur l'accumulation de matière sèche par les feuilles (a), les tiges (b), les racines (c) et les fruits (d), à la fin de l'essai sont présentées dans la figure 8. On y observe dans tous les cas l'accroissement de la dose d'azote a induit un accroissement dans la production et l'accumulation de matière sèche. Il faut l'exception au niveau des fruits où la dose de 225 kg/ha d'azote a entraîné une diminution de la production et d'accumulation de la matière sèche. Ce cas particulier peut s'expliquer par la croissance végétative plus prononcée au détriment du développement des fruits. Cette croissance végétative exubérante est attestée par les valeurs de matière sèche des feuilles, des tiges et des racines.





**Figure : 8 : Effet de doses croissantes de N sur l'accumulation de matière sèche par les plantes**

Ce résultat corrobore les conclusions auxquelles sont parvenues des chercheurs Gros (1966) et Wallace (1970). Selon lesdites conclusions l'azote est un élément qui fait partie non seulement les acides aminés et des protéines mais également de nombreux composés tels que la chlorophylle, les enzymes qui jouent des rôles déterminants dans le processus de la photosynthèse, de la production et de l'accumulation des substances organiques ainsi dans le processus de la croissance cellulaire.

Les différences entre les valeurs de la matière sèche ont été plus prononcées au niveau des tiges qu'au niveau des feuilles et fruits.

### **Rendement, ses composantes et la qualité des fruits**

Il y a eu une réponse notable des plantes à l'accroissement du niveau d'azote appliqué. En effet avec des apports de 75 et 150 kg/ha d'azote, il y a eu une augmentation de rendement de plus de 200 et 280 % respectivement en comparaison avec le traitement sans application d'azote (traitement témoin) selon les données présentées dans le tableau 17.

**Tableau 17** : Effets de doses croissantes d'azote sur le rendement, ses composantes et la qualité interne des fruits

Dose de N (kg/ha)	Rend (g/pl)	Poids moy (g)	Nbre fruits/pl	Acidité (%)	Brix (%)
0	483,81 d	84,22 c	5,74 d	0,54 c	4,13 c
75	1475,98 d	109,24 b	13,51 d	0,61 b	4,28 c
150	1864,32 a	126,93 a	14,89 a	0,64 a	4,71 b
225	1300,84 c	109,26 b	11,99 c	0,55 c	5,09 a
Exr	4,04 ***	1,47 ***	1,24 ***	0,03 ***	1,09 ***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

Il est important de souligner que la dose de 225 kg/ha d'azote s'est révélée excessive en provoquant une diminution du rendement de plus de 40% par rapport au rendement obtenu avec l'apport de 150 kg/ha d'azote.

Le poids moyen et le nombre de fruits par plant ont eu un comportement similaire à celui du rendement. Les diminutions provoquées sont évaluées à 15% pour le poids moyen des fruits par plant et 27% pour le nombre de fruits par plant. En ce qui concerne la qualité interne des fruits, la fertilisation azotée a eu des effets hautement significatifs sur le pourcentage d'acidité et les teneurs des fruits en solides solubles totaux.

Dans le cas de l'acidité des fruits, la dose de 150 kg/ha d'azote apparaît comme la meilleure car on note une diminution avec l'application de 225 kg/ha d'azote. Par contre, les teneurs en solides solubles totaux ont augmenté avec l'accroissement du niveau d'azote apporté.



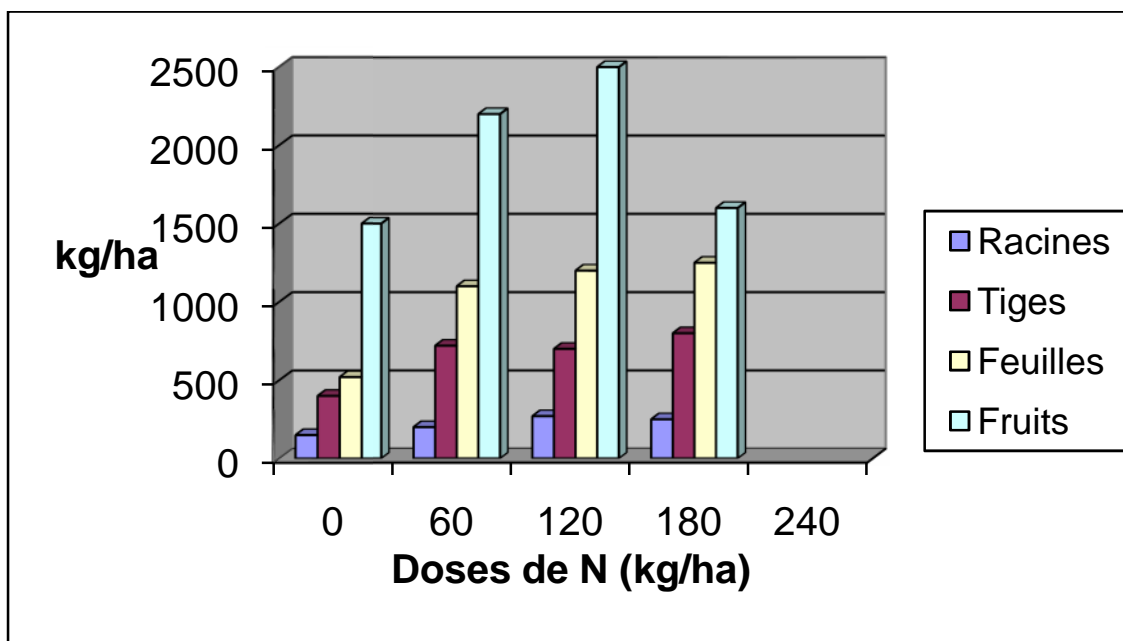
Les résultats précédents prouvant la nécessité d'apporter des engrais minéraux azotés aux substances en dépit de leurs teneurs en matière organique. Si l'on se réfère au fait que la tomate est une culture de cycle court, l'affirmation antérieure pourrait trouver son explication dans le fait que la vitesse de libération et de mise à disposition de l'azote est plus faible que la vitesse d'absorption de cet élément par les plantes.

### **Expérimentation 2 : " Réponse de la tomate variété campbell- 28 à des doses croissantes d'azote sous fertigation goutte à goutte dans un sol ferrallitique rouge"**

#### **Effet de doses croissantes d'azote sur l'accumulation de matière sèche par les plantes**

La figure 9 montre le comportement de la matière sèche dans les différents organes des plantes. A la fin de l'expérimentation, on observe que l'accumulation de la matière sèche présente un comportement similaire à celui de l'apport d'azote à l'exception des fruits. Comme il fallait s'y attendre, les valeurs les plus faibles de matière sèche accumulée ont été obtenues sous le traitement sans apport d'azote. Les valeurs les plus élevées ont été obtenues avec l'application de 240 hg/ha d'azote. Ces résultats confirment la théorie selon laquelle l'azote est le facteur de croissance des plantes ; car une plante bien "alimentée en azote émerge rapidement et acquiert un grand volume. Wallace (1970) affirme que, pour toutes les fonctions au sein de quantités relativement élevées. L'azote est donc le premier des éléments essentiels pour la plante. Ce résultat s'apparente fort bien à celui obtenu dans l'essai 2.

Le poids des feuilles sèches a été supérieur à ceux des autres organes secs. Celui des tiges se place au deuxième rang tandis que le poids le plus faible a été obtenu au niveau des racines. Ces résultats coïncident avec ceux reportés par Cook et al (1991).



**Figure 9 : Effet de doses croissantes d'azote sur l'accumulation de matière sèche**

### **Effet de doses croissantes d'azote sur le rendement et la qualité interne des fruits**

On observe une forte réponse des plantes aux diverses doses d'azote appliquées (tableau 18). Les résultats que présente ce tableau couvrent les campagnes agricoles 1994 – 1995 et 1995 – 1996. On remarque que les résultats obtenus ont eu un comportement identique au cours des deux campagnes. En effet, à doses d'azote égales au cours des deux campagnes l'ordre de mérite des moyennes selon la preuve de Dunca avec 5% de probabilité est égal.

La courbe de réponse obtenue à partir des moyennes des deux campagnes agricoles est présentée dans la figure 10. L'équation qui a le mieux décrit la réponse des plantes à l'accroissement de la dose d'azote appliquée est la suivante :

$$Y = 40,81 [(X- 157,8)^2 / - 19270]$$

où Y est le rendement exprimée en t/ha et X la dose d'azote exprimée en kg/ha.

Le coefficient de détermination R<sup>2</sup> est égal à 0,99. Le point maximal agronomique (PMA) correspond à la dose de 160 kg/ha, avec un rendement de 40 t/ha. Le point maximal économique (PME) est de 155 kg/ha. On observe dans la figure qu'avec la dose de 240 kg/ha d'azote, les rendements ont chuté par rapport à ceux obtenus avec l'application de 120 kg/ha. Ce résultat coïncide avec celui obtenu dans l'essai 2 où la dose de 225 kg/ha d'azote a provoqué une diminution de rendement. Tout ceci confirme

les résultats obtenus par Papadopoulos (1991). Cet auteur affirme que le succès de producteur de tomate réside dans le maintien d'une bonne relation entre la croissance végétative et la croissance reproductive. Les plantes qui présentent une croissance végétative exagérée sont souvent associées à de faibles productions.

**Tableau 18** : Rendement de la tomate variété Campbell-28 au cours de deux campagnes différentes.

Dose de N (kg/ha)	Rendement (t/ha)	
	1994-1995	1995-1996
0	10,65 e	11,80 e
60	23,69 d	26,30 d
120	35,91 b	38,73 b
180	37,98 a	42,80 a
240	27,48 c	29,71 c
Esx	0,12 ***	0,09 ***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

Par ailleurs, les résultats antérieurs permettent d'affirmer que les rendements relativement faibles obtenus au niveau des plantes sous fertigation goutte à goutte dans l'expérimentation 1 (32,32 t/ha), pourraient être dues principalement à la dose élevée d'azote (200 kg/ha) appliquée.

D'après de nombreux chercheurs, l'excès d'azote produit au niveau de la culture de tomate, un développement végétatif exubérant avec un nombre faible d'organes reproductifs. Bogomolova (1976) et Fawusi (1977), affirment à propos que l'excès de l'azote chez la tomate provoque une maturité tardive de la plante. A la figure 10 on observe que les rendements les plus élevés en ce qui concerne les fruits de première et seconde classe ont été obtenus avec l'application de 180 kg/ha d'azote. La courbe de réponse décrite plus haut ainsi que les points maximaux agronomiques et économiques découlant de ladite courbe puis le comportement des meilleures classes de fruits démontre l'importance de l'application de dose adéquate d'azote pour obtenir de meilleures productions.

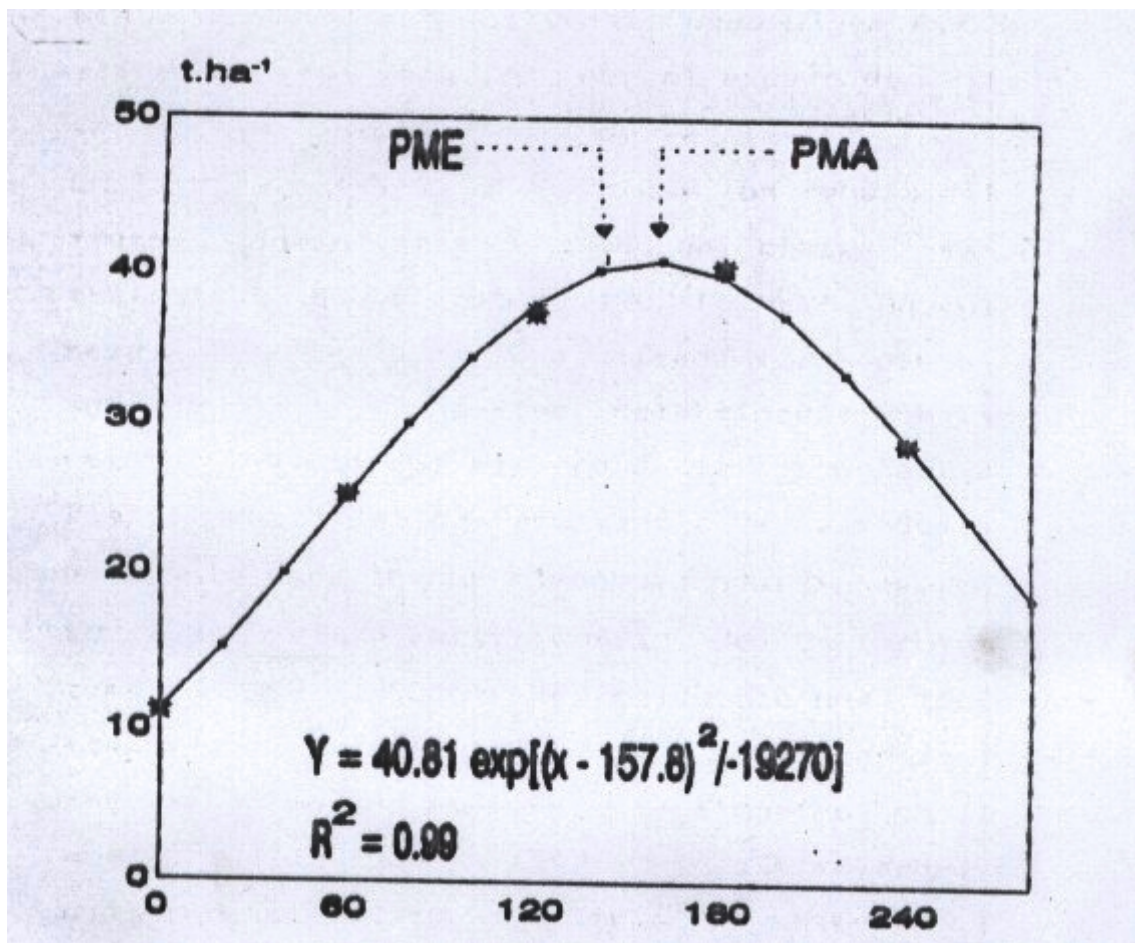


Figure 10 : Courbe-réponse de la tomate à la variation des doses d'azote

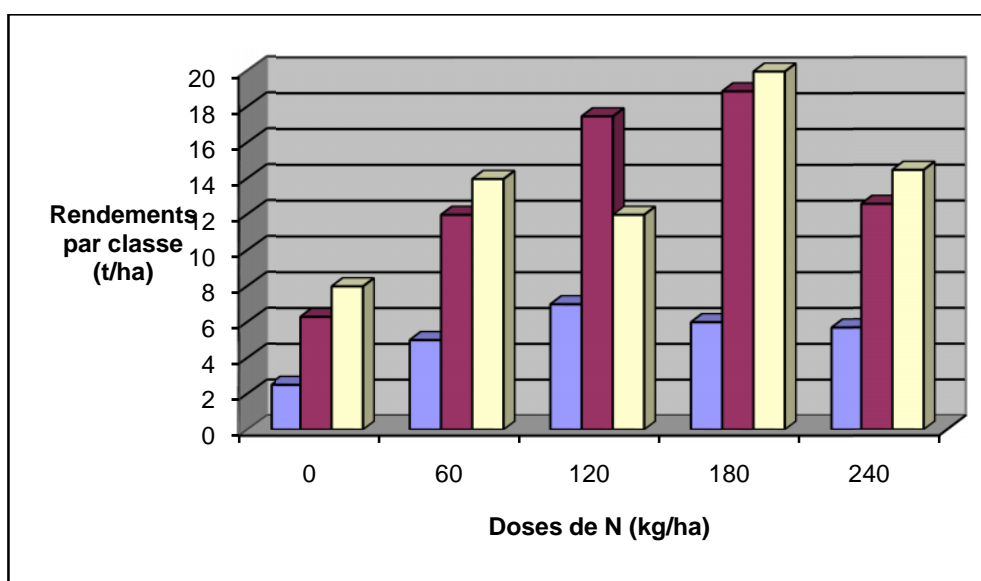
Quant au poids moyen de fruits (tableau 19), aucune tendance définitive de son comportement relativement à la croissance des doses d'azote appliquées ne peut être dessinée au cours de la campagne agricole 1994-1995. Par contre, au cours de celle de 1995-1996, non seulement la tendance a été claire et identique à celle des rendements mais également on remarque que les valeurs sont plus élevées que celles de la campagne 1994-1995 et ce niveau de tous les traitements. Ce résultat pourrait être dû aux conditions climatiques nettement plus favorables au cours de la campagne 1995-1996.

**Tableau19** : Poids moyens des fruits au cours des différentes campagnes agricoles

Dose de N (kg/ha)	Poids moyens des fruits (g)	
	1994-1995	1995-1996
0	69,63 c	73,29 d
60	62,88 d	90,25 c
120	70,32 b	105,11 b
180	69,47 c	121,62 a
240	72,36 a	104,93 b
Esx	0, 21***	0,63 ***

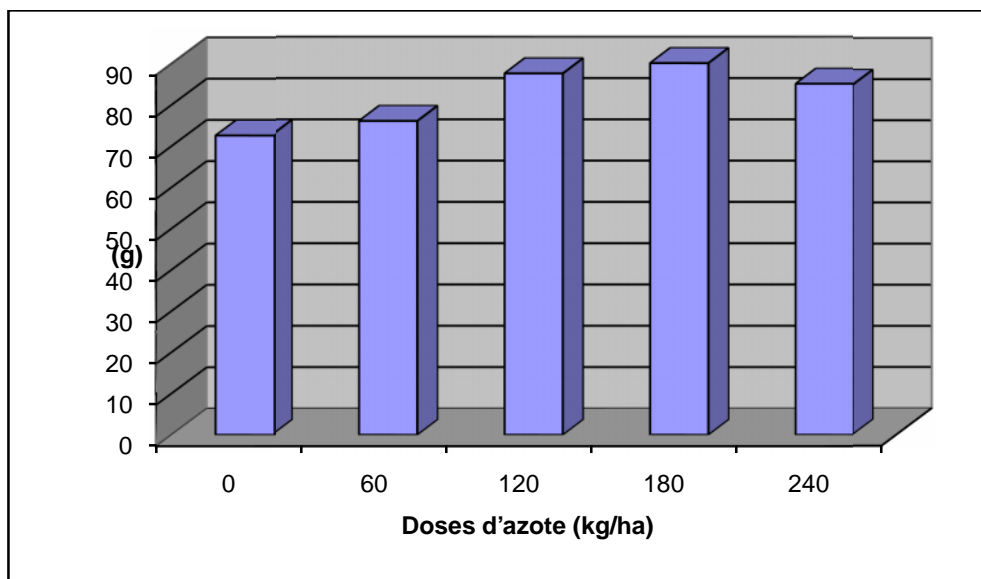
(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

L'accroissement général des poids moyens des fruits observé au niveau de la figure 11 (valeurs moyennes des deux campagnes), démontre que l'application de l'azote a engendré une augmentation du poids moyen des fruits. L'application de 240 kg/ha d'azote a eu un effet négatif sur cette composante du rendement par rapport à l'apport de 180 kg/ha. Ce résultat confirme l'affirmation de Vexcull (1979), selon laquelle l'excès de l'azote chez la tomate provoque une diminution de la taille des fruits. Avec l'apport de 180 kg/ha d'azote, le poids moyen a atteint la valeur de 95,54 kg.



**Figure 11** : Effet des doses croissantes d'azote sur les rendements par classe de la tomate

L'accroissement du niveau d'azote apportée aux plantes a eu des effets hautement significatifs sur le nombre de fruits par plant. Ainsi, on observe une nette tendance d'accroissement du nombre de fruits par plant à mesure que le niveau d'azote appliquée augmente (figure 12). Ce constat est fait pour les deux campagnes agricoles.



**Figure 12 : Effet des doses croissantes d'azote sur le poids moyen des fruits**

Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la production des fruits dépend de la floraison. Avec des niveaux d'azote insuffisants, le nombre de fleurs diminue ou bien le développement des fleurs est affecté ; celles-ci vieillissent de façon prématurée avant leur ouverture (Adam, Winsor et Donald, 1973), a observé en effet, que des teneurs faibles en azote dans la solution nutritive, non seulement ont provoqué un retard dans l'ouverture des fleurs, sinon qu'elles ont entraîné une augmentation de pourcentage de fleurs avortées.

L'application de 60 kg/ha a induit une augmentation de plus de 180 % du nombre de fruits par plante par rapport au témoin. Par ailleurs, il faut signaler qu'il n'y a pas eu de différence significative entre les nombres de fruits par plante obtenue avec l'application de 120 kg/ha d'azote de celle de 180 kg/ha. Ceci amène à affirmer que les différences dans les rendements obtenus au niveau de ces deux traitements sont dus essentiellement à l'effet de l'application de 180 kg/ha d'azote sur le poids moyen des fruits.

La dose de 240 kg/ha d'azote s'est révélée excessive avec un effet négatif sur le nombre de fruits par plant comme se fut le cas pour les rendements et les poids moyens des fruits. La diminution du nombre de fruits par plant avec la dose de 240

kg/ha d'azote est évaluée à 25 % par rapport au nombre de fruits par plant obtenu avec 180 kg/ha voire celui obtenu avec 60 kg/ha d'azote.

D'après les résultats présentés au tableau 20, la fertigation azotée goutte à goutte n'a pas eu d'influence significative sur l'acidité ni la teneur en solides solubles totaux des fruits.

**Tableau 20** : Effet de doses croissantes d'azote sur la qualité interne des Fruits

Dose de N (kg/ha)	S.S.T. (%)	Acidité (%)
0	3,77	0,39
60	3,91	0,37
120	4,00	0,36
180	3,94	0,40
240	4,01	0,37
Esx	0,13 n.s.	0,03 n.s.

*S.S.T. = solides solubles totaux*

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

### **Effet de doses croissantes d'azote sur les teneurs de feuilles en azote, phosphore et potassium**

Les teneurs des feuilles en azote, phosphore et potassium se sont accrues à mesure que les plantes croissent et se développent et ce malgré tous les traitements y compris celui sans apport d'azote. Les valeurs égales au début de l'essai se sont accrues tout en se différenciant jusqu'à 105 jours après le semis. Ce dernier aspect peut être expliqué par le fait que le rapport entre l'approvisionnement des plantes en nutriments et l'absorption de ceux-ci par les plantes a été plus favorable. Maria Grela (1991), avec la même variété de tomate sur les sols Ferrallitiques jaunes de Pinar del Rio, a publié des résultats similaires.

Le résultat précédent ne correspond pas à ceux publiés par Tomic-Sofa et Saciragic (1970), qui ont indiqué que la teneur en azote des parties aériennes des plantes au début de la floraison, est élevée avec des valeurs maximales pendant la fructification.

Selon les mêmes auteurs, la teneur en phosphore et potassium de ces parties aériennes s'est accrue depuis la floraison jusqu'à l'obtention des fruits verts.

La relation entre les rendements obtenus sous chaque traitement et les teneurs correspondantes en azote dans les feuilles 75 jours après le semis a été :

$$Y = [0,25 (X - 2,53) - 1] \text{ avec } R^2 = 0,97 \text{ où } Y = \text{rendement ;}$$

X = teneur en N des feuilles.

La valeur élevée du coefficient de détermination obtenue après des simulations du comportement des rendements en fonction des teneurs en azote des feuilles, permet d'affirmer que l'analyse foliaire est indiquée pour connaître l'état nutritionnel des plantes 75 jours après le semis. On en déduit que l'analyse foliaire à 75 jours après le semis est un excellent moyen pour établir le diagnostic de l'état nutritionnel des plantes dans les conditions similaires à celles de l'étude.

### **Extractions d'azote, de phosphore et de potassium par les plants**

Les extractions totales d'azote, de phosphore et de potassium par les plantes 105 jours après le semis ont été significativement influencées par les différentes doses d'azote appliquées selon les résultats présentés dans le tableau 21. Ces extractions ont été, de manière générale, en correspondance avec l'accroissement du niveau du nutriment appliqué. Dans les différents traitements, l'ordre de grandeur des valeurs d'extraction a été potassium > azote > phosphore à l'exception de la dose de 240 kg/ha d'azote avec laquelle l'ordre obtenu a été azote > potassium > phosphore. La correspondance entre les extractions de phosphore et potassium avec l'accroissement du niveau d'azote dans le bulbe humide du sol peut s'expliquer, entre autres facteurs, par le fait que l'azote entraîne l'augmentation de la capacité d'échange cationique des racines, et ainsi, l'augmentation de l'absorption des autres éléments nutritifs (Susai, Krish namoorthy et Logonathan, 1975). En outre, du fait d'une meilleure croissance végétative avec l'application des doses croissantes d'azote, les besoins des plantes en phosphore et potassium augmentent. Les extractions totales de nutriments réalisées par les plantes (toutes parties confondues) sous les différents traitements ont été beaucoup plus élevées que les valeurs reportées par des auteurs comme Arzola (1979), Guzman et al. (1979) et Maria Grela (1991), dans les conditions de Cuba ; puis Uexcull (19979). Ceci peut se justifier par les valeurs élevées des paramètres de croissance obtenues et surtout par les rendements relativement élevés obtenus avec l'utilisation combinée de



l'eau et des nutriments à haute fréquence. Les résultats obtenus dans l'expérimentation 1 entérinent cette affirmation.

**Tableau 21** : Effet de doses croissantes d'azote sur les extractions totales d'azote, de phosphore et de potassium

Doses de N (kg/ha)	N	P	K
0	40,54 d	17,45 e	46,97 e
60	82,25 c	33,78 d	90,99 d
120	145,75 b	60,24 c	166,95 b
180	185,88 a	78,15 b	204,82 a
240	188,51 a	82,06 a	156,16 c
E.s.x	1,17***	1,02 ***	0,05***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

Les exportations d'azote par les récoltes ont constitué 23,01% des extractions totales d'azote réalisées par les plantes dans le traitement sans apports d'azote ; 32,71% ; 30,84% ; 28,45% et 16,86% respectivement avec les doses de 60, 120, 180 et 240 kg/ha d'azote.

Quant au phosphore, les exportations ont été de 14,84% dans le traitement sans apports d'azote, 19,42% ; 21,11% ; 19,23% et 11,71% respectivement avec 60 ; 120 ; 180 et 240 kg/ha d'azote.

Enfin pour le potassium, elles ont été de 45,16% sans apports d'azote et de 27,35% ; 25,25% ; 24,06% et 22,27% respectivement pour l'application de 60 ; 120 ; 180 et 240 kg/ha d'azote.

**Coefficient d'assimilation apparente (C.A.A.) efficience agronomique (E.A) et physiologique (E.P).**

Le coefficient d'assimilation apparente a augmenté avec l'accroissement des niveaux d'azote dans le bulbe humide du sol jusqu'à hauteur de 120 kg/ha qui correspond à la valeur maximale (tableau 22). A partir de ce niveau, on observe une diminution du

coefficient bien que les valeurs obtenues avec l'application de 180 kg/ha peuvent être considérées comme étant similaires à celles obtenues avec 240kg/ha.

Les résultats précédents montrent qu'avec des doses d'azote faibles (60kg/ha) et moyennes (120kg/ha), les pertes de cet élément sont moindres. Ces pertes deviennent importantes avec l'application de doses élevées. Ce fait peut se justifier par l'affirmation de Feign, Letey et Jarrel (1982) selon laquelle la capacité de rétention de l'azote par le sol en conditions de fertigation localisée est saturée de façon relativement plus rapide. Ceci est dû au fait de la haute fréquence d'application de cet élément ; l'azote se déplace donc le long du bulbe humide et s'éloigne de la portée des racines abondantes des plantes.

**Tableau 22** : Effet de doses croissantes d'azote sur le coefficient d'assimilation apparente, les efficacités agronomique et physiologique.

Doses de N (kg/ha)	C.A (%)	E.A (kg/fruits/kg de N.appliqués)	E.P (kg/fruits/kg N. extraits)
0	-	-	-
60	69,01	229,83	333,01
120	87,01	217,66	248,97
180	80,57	162,16	201,25
240	61,52	72,45	117,76

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

L'efficacité agronomique de l'azote pour les rendements totaux a présenté un comportement décroissant à mesure que les niveaux d'azote appliqués augmentent. Ces résultats reflètent le fait que l'augmentation de rendement induite par unité d'accroissement du nutriment est proportionnelle au décroissement du rendement maximal. Ceci est connu sous la loi de Mitscherlich.

La valeur la plus élevée de l'efficacité agronomique a été obtenue avec l'application de 60kg/ha d'azote tandis que l'apport de 240kg/ha a entraîné une diminution notable par rapport à l'application de 180kg/ha. Des résultats identiques ont été publiés par Bar-Yosef et Sagiv (1982), Lopez (1985) et Maria Grela (1991).

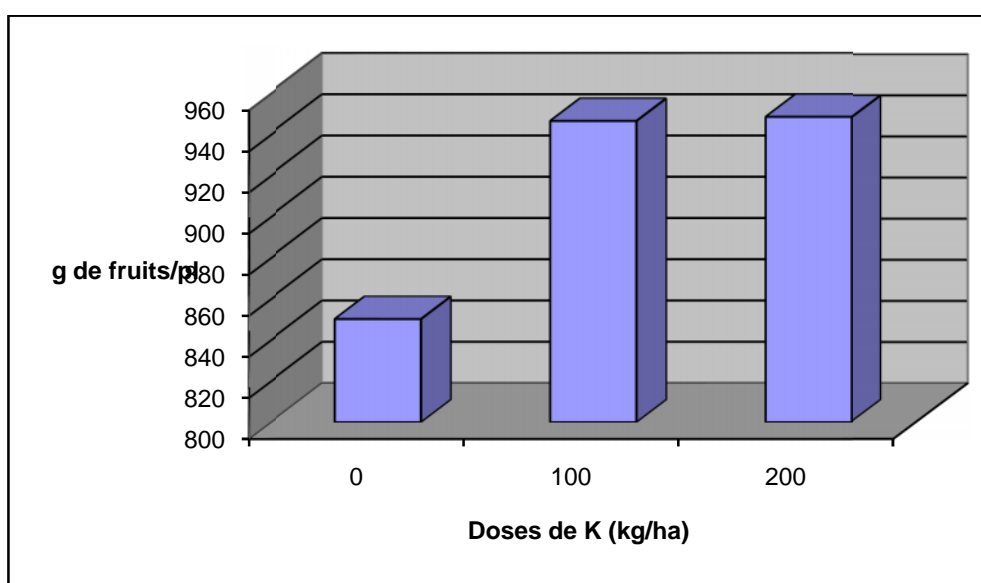
Quant à l'efficacité physiologique, son comportement a été similaire à celui de l'efficacité agronomique. Dans ce cas, l'explication réside dans le fait que l'augmentation des niveaux d'azote dans le bulbe humide du sol est supérieure à la production et l'accumulation de biomasse de la culture comme l'ont montré les figures 8 et 9 antérieurement analysées et ceci aussi bien dans les bacs que dans le champ. D'autre part, l'extraction totale d'azote est supérieure (tableau 21). Les valeurs d'efficacité physiologique ont été inférieures à celles publiées par Maria Grela (1991) pour la même variété de tomate mais avec l'utilisation de l'irrigation par aspersion et application manuelle d'engrais. On comprend donc que sous fertigation goutte à goutte du fait d'une disponibilité plus grande d'azote dans le bulbe humide du sol et de la masse racinaire plus élevée (surface absorbante plus grande), les extractions de ce nutriment par les plantes sont considérablement supérieures. Les raisons évoquées ne sont que quelques unes des explications possibles.

## ***Effet de doses croissantes de potassium***

### **Essai 3 : "Etude de la réponse de la tomate variété Campbell- 28 à l'application de doses croissantes de potassium sur substrat de zéolite en condition de canneaux"**

#### **Réponse de la tomate variété Campbell-28 à différents niveaux de potassium**

A la figure 13, on observe une réponse hautement positive des plantes à l'accroissement du niveau de potassium dans le sol. Les valeurs de rendements de tomate les plus élevés ont coïncidé avec les niveaux les plus élevés de potassium dans le sol.



**Figure 13 : Réponse de la tomate à des doses croissantes de potassium**

Ce résultat coïncide avec celui rapporté par Borkowski et Szwonek (1987). Il n'y a pas eu de différence significative entre les rendements obtenus avec l'application de 100 kg/ha et celle de 200 kg/ha de  $K_2O$ . Ceci amène à déduire que la zéolite a eu une influence notable sur la quantité de potassium disponible pour les plantes.

Les résultats présentés dans le tableau 23 montre que les différents niveaux de potassium apportés au substrat ont eu des effets notables sur le poids moyen, le pourcentage de matière sèche l'acidité et les teneurs des fruits en solides solubles totaux. Ces effets n'ont pas été remarqués en ce qui concerne le nombre de fruits par plante. Le poids moyen de fruits a augmenté avec l'accroissement du niveau de

potassium apporté au substrat et ce jusqu'à 100 kg/ha. Ce résultat pourrait se justifier par le rôle de l'ion  $K^+$  dans la biophysique et la biochimie des processus de croissance cellulaire ainsi que des interactions entre les sites de production et les sites de consommation des substances élaborées par les plantes. Aussi, est-il important de souligner que l'absorption de l'eau par les cellules des fruits (obtenus par la différence entre les poids moyens et les matières sèches des fruits) a été plus élevée avec l'application de doses de potassium élevées. Ce résultat confirme celui publié par Rajagopal (1987). Cet auteur a, en effet, indiqué que l'absorption de l'eau et la perméabilité des racines augmentent avec l'application de doses élevées de potassium. Mottran (1985), avait signalé que la taille des fruits de tomate est influencée en grande partie par l'état hydrique des plantes. Cet aspect a été confirmé par Andeterro (1990), qui suite à des études sur l'effet de doses croissantes de potassium sur l'état hydrique des plantes cultivées en conditions arides a montré que cet élément a permis d'améliorer l'état hydrique desdites plantes.

Dans ce tableau, on remarque que l'application de 100 kg/ha de  $K_2O$  a permis d'obtenir des augmentations significatives des valeurs de matière sèche. Ces augmentations sont similaires à celles obtenues avec l'apport de 200 kg/ha de  $K_2O$ . En ce qui concerne le pourcentage d'acidité des fruits, l'apport de potassium au substrat a augmenté significativement sa valeur par rapport au témoin. On remarque cependant que la variation entre les doses appliquées a été significative. Les teneurs des fruits en solides solubles totaux (Brix) se sont accrues à mesure que les niveaux de potassium dans le substrat ont augmenté.

**Tableau 23** : Effet de doses croissantes de potassium sur le rendement, ses composantes et la qualité interne des fruits.

$K_2O$ (kg/ha)	Poids moyen (g)	Nbre de fruits/pl	M.S. (%)	Acidité %	Brix (%)
0	72,08 c	11,68	4,33 b	0,51 b	3,87 a
100	80,02 b	10,27	5,57 a	0,62 a	4,25 b
200	86,09 a	11,89	5,59 a	0,61 a	4,79 a
Esx	0,92***	0,81 n.s	1,03 ***	0,97 ***	0,8 ***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

Ces résultats coïncident avec celles publiées par Ragimova (1981) et Bajaj (1990). Lachover (1972), suite à des études sur l'effet du potassium sur la tomate en conditions de pots avec des sols typiques d'Israël qui n'ont pas reçu des engrais durant plusieurs années, a affirmé que l'accroissement de la dose de potassium a permis une augmentation notable des rendements et la qualité externe des fruits ainsi que leur teneur en matière sèche. L'auteur a cependant signalé qu'il n'y a pas eu de différence significative en ce qui concerne l'acidité des fruits tandis qu'il y a eu une diminution de la teneur en sucre desdits fruits.

### **Extraction de NPK par les plantes 105 jours après le semis**

Il y a eu une réponse positive de la culture de tomate aux doses croissantes de potassium jusqu'à 100 kg/ha quant aux extractions des éléments azotes, phosphore et potassium (tableau 24).

En effet, l'augmentation du niveau de potassium dans le substrat a entraîné une grande consommation par les plantes des éléments précédemment cités. Mackmur, Gerloff et Gabelman (1978), ont affirmé que l'accroissement du niveau de potassium à la disposition des racines plantes augmente les teneurs des nutriments dans ces plantes. Ces auteurs ont justifié ce fait par la capacité du potassium d'améliorer considérablement l'absorption de l'eau de la solution du sol et, partant, l'absorption des nutriments dissouts dans cette eau. Dans le même sens Andersen, Buchanan et Albrigo (1979), ont publié suite à une étude sur les relations hydriques des plantes que les teneurs en nutriments des végétaux les plus élevés sont associés aux plantes qui ont été les mieux approvisionnées en eau.

**Tableau 24** : Extraction totales de NPK (kg/ha) 105 jours après le semis.

Dose de K (kg/ha)	N	P	K
0	19,02 b	4,35 b	27,17 b
100	20,53 a	5,01 a	32,36 a
200	20,23 ab	5,44 a	34,48 a
Esx	0,43 ***	0,17 ***	0,97 ***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

En terme de quantité, on remarque dans le tableau précédent que le potassium a été le nutriment le plus extrait alors que le phosphore en est le moins.

En somme les influences notoires de l'accroissement aussi bien de l'azote (expérimentation 2 et 3) que du potassium (expérimentation 4) sur des paramètres comme la croissance et le développement des plantes, le rendement et ses composantes, la qualité interne des fruits et l'absorption des nutriments par les plantes amènent à déterminer l'effet de ces éléments combinés sur les paramètres précédemment énumérés.

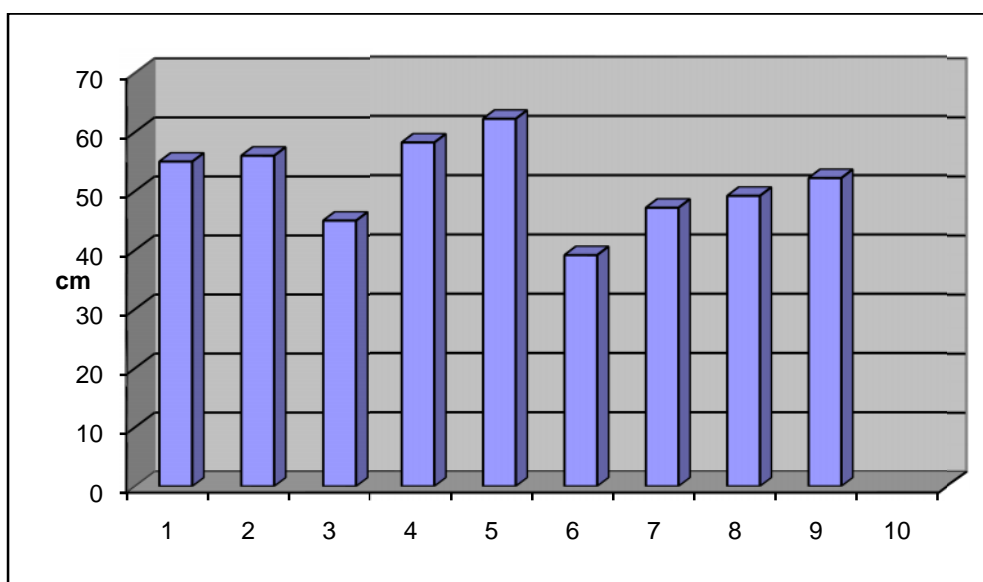
## ***Effet des interactions azote-potassium sur la croissance et le développement de la tomate variété Campbell-28***

**Expérimentation 3 :** Etude de l'effet de la combinaison azote-potassium sur la culture de la tomate variété Campbell-28 sur un sol Ferrallitique rouge sous fertigation goutte à goutte

### **Variables de croissance**

L'azote et le potassium ont présenté une interaction hautement significative sur la hauteur des plantes d'après la figure 14.

La combinaison N<sub>120</sub> K<sub>75</sub> a permis d'obtenir les plantes les plus hautes (57,41 cm). Avec N<sub>180</sub> K<sub>0</sub>, les plantes ont présenté la plus faible croissance (36,87 cm). Ce dernier résultat pourrait résulter du fait que l'effet positif des doses élevées de l'azote sur la croissance a forcément besoin d'un approvisionnement conséquemment adéquat des plantes en potassium.



**Figure 14 : Effet des combinaisons N-K sur la hauteur des plants 115 jours après le semis**

**1 : N<sub>60</sub>K<sub>0</sub>**

**4 : N<sub>120</sub>K<sub>0</sub>**

**7 : N<sub>180</sub>K<sub>0</sub>**

**2 : N<sub>60</sub>K<sub>75</sub>**

**5 : N<sub>120</sub>K<sub>75</sub>**

**8 : N<sub>180</sub>K<sub>75</sub>**

**3 : N<sub>60</sub>K<sub>150</sub>**

**6 : N<sub>120</sub>K<sub>150</sub>**

**9 : N<sub>180</sub>K<sub>150</sub>**

Les combinaisons 60 et 120 kg/ha d'azote avec 150 kg/ha de K<sub>20</sub> ont permis d'avoir les valeurs de hauteur des plantes plus faibles que celles obtenues avec la combinaison de



ces mêmes doses d'azote avec 0 et 75 kg/ha de potassium. Avec 180 kg/ha d'azote, les meilleurs résultats ont été obtenus avec 150 kg/ha de potassium. Ces résultats qui coïncident avec ceux publiés par Anderson, Jensen et Lösch (1994), indiquent que la combinaison de faibles doses d'azote avec des doses élevées de potassium influe négativement sur la croissance des plantes. Par contre, une combinaison de dose adéquate d'azote avec des doses élevées de potassium permet d'obtenir des valeurs satisfaisantes des hauteurs des plantes.

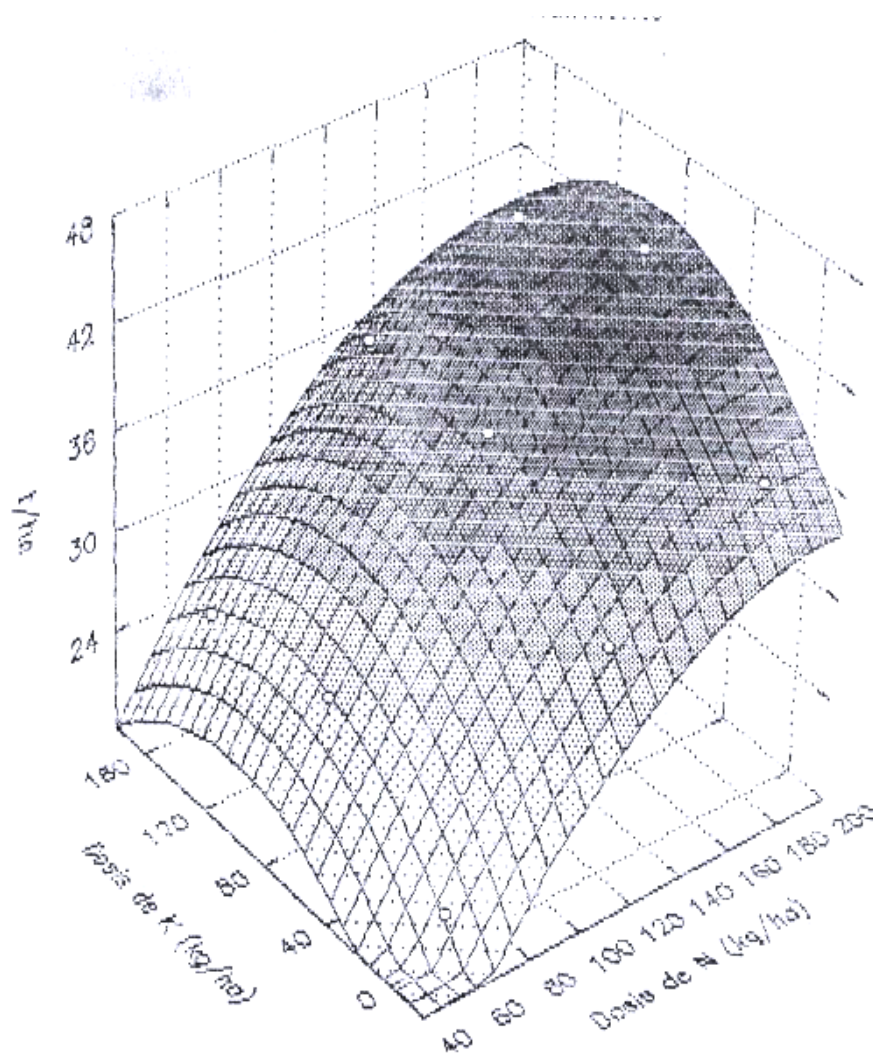
Il faut signaler un effet hautement significatif des différentes combinaisons d'azote-potassium sur le diamètre des tiges des plantes. 59 jours après le semis, les traitements qui ont permis d'avoir les réponses adéquates, selon les critères de Papadopoulos (1991) et qui ont été définies dans le chapitre 4.1.1. de l'expérience 1, ont été  $N_{60} K_{75}$  et  $N_{180} K_{150}$ . La combinaison la moins indiquée est  $N_{120} K_0$ . 87 jours après le semis, les combinaisons qui ont permis les meilleures réponses ont été  $N_{60} K_{75}$ ;  $N_{180} K_0$  et  $N_{180} K_{150}$ . Ces différents résultats représentent l'étroite interdépendance qui existe entre l'azote et le potassium.

### **Influence de la combinaison azote-potassium sur le rendement et ses composantes**

L'analyse bifactorielle faite avec les données obtenues, a révélé des interactions hautement significatives entre les différents niveaux des nutriments appliqués. L'interdépendance entre l'azote et le potassium puis l'influence de cette interdépendance sur les rendements a été signalée par de nombreux chercheurs suite à des études sur diverses cultures.

Barneix et Breteler (1984), Chen et Mac Kenzie (1994), Anderson, Jensen et Lösch (1994), par exemple, suite à des études relatives aux effets de l'azote et du potassium sur la sous fertigation goutte à goutte, ont indiqué que l'absorption d'ions N est favorisée par les ions K car ces derniers stimulent le transport des ions N des racines vers les feuilles.

La figure 15 représente la surface de réponse du rendement de la tomate à la variation des doses d'azote et de potassium.



**Figure 15 : Surface de réponse du rendement de la tomate à la variation des doses d'azote et de potassium**

On y apprécie que la zone marquée par les bornes ci-après : de 160 à 180 kg/ha d'azote et de 60 à 100 kg/ha de potassium est la zone des meilleures combinaisons azote-potassium. L'équation mathématique ci-dessus, est celle qui s'ajuste le mieux à la réponse du rendement de la tomate aux variations simultanées des niveaux d'azote et de potassium dans le bulbe humide du sol.

$$Y = -19,29 + 0,35X_1 + 0,75X_2 - 0,003546 X_1X_2 - 0,000875X_2^2$$

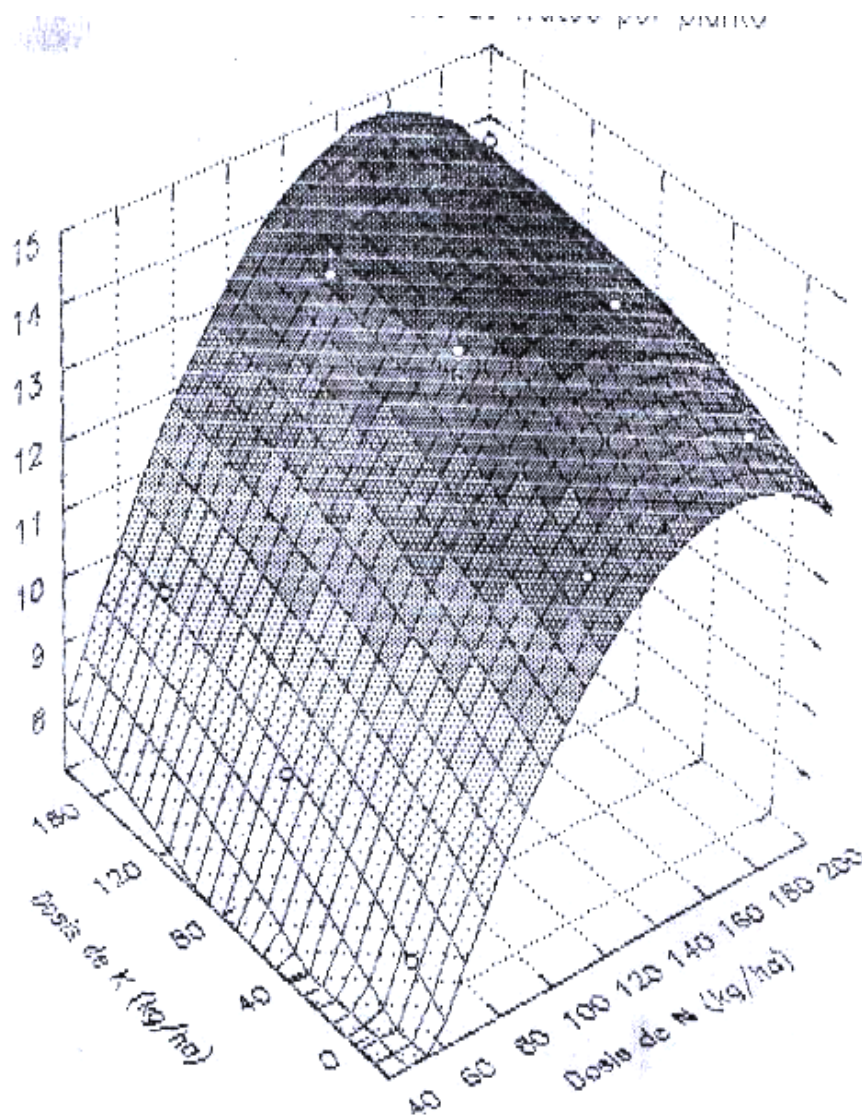
où Y est le rendement exprimé en t/ha ;  $X_1$  et  $X_2$  sont les doses d'azote et de  $K_2O$  exprimées en kg/ha respectivement.

Il faut signaler que le coefficient de détermination  $R^2 = 0,93$ . De cette équation mathématique, la meilleure combinaison a été 163 kg/ha de N avec 98,7 kg/ha de  $K_2O$  pour un rendement maximal, de 46,19 t/ha. Behboudian et Anderson (1990), ont indiqué que des niveaux adéquats de potassium favorisent des aires foliaires plus grandes et une activité photosynthétique significativement majeure.

Ce résultat coïncide avec ceux publiés par Borkowski et Szowenek (1987) sur la tomate puis Klein (1992) sur la pomme fruit. Il confirme, par ailleurs, la dose optimale d'azote obtenue dans l'expérimentation 2 puis met en évidence l'effet dépressif sur les rendements de l'excès de potassium (300 kg/ha). Cet effet a été noté aussi dans l'expérimentation 1 où les teneurs initiales de potassium interchangeable du sol sont de 0,69 et 0,71 cmol/kg respectivement et catégorisées comme élevées.

Par ailleurs, on peut déduire que la réponse du rendement de la tomate à la dose de 200 kg/ha de  $K_2O$ , observée dans l'essai 3, est due à l'effet de la zéolite sur le potassium interchangeable.

L'analyse bifactorielle des données de nombre de fruits par plant (figure16) a révélé l'existence d'interactions hautement significatives entre l'azote et le potassium. En effet, l'augmentation des doses des deux nutriments a entraîné, jusqu'à un certain niveau, un accroissement du nombre de fruits par plant. Les nombres de fruits par plant les plus élevés correspondent à la zone délimitée par les courbes des doses d'azote de 160 à 180 kg/ha et celles du potassium supérieures à 120 kg/ha.



**Figure 16 : Surface de réponse du rendement de la tomate à la variation des doses d'azote et de potassium**

D'après Ignatov (1980), les engrais potassiques réduisent le pourcentage de chute des fleurs et augmentent la fructification des tomates. Martin (1989), a indiqué qu'il existe de nombreuses preuves que le potassium exerce un effet bénéfique sur le mouvement au sein de la plante des éléments dissouts dans la solution du sol. Ce mouvement est du au rôle osmotique que joue cet élément dans les cellules et tissus des plantes.

En ce qui concerne le poids moyen des fruits, l'accroissement des doses d'azote a entraîné une augmentation à petit pas, de cette variable jusqu'à la dose de 120 kg/ha. A partir de la dose kg/ha d'azote, on observe un accroissement brusque et prononcé du poids moyen des fruits pour les différents niveaux de  $k_2O$ . Il importe de faire remarquer

que les doses  $k_2O$  jusqu'à 130 kg/ha ont eu des effets positifs sur la taille des fruits. Les doses supérieures à 130 kg/ha de  $k_2O$  ont été excessives du fait de la chute du poids des fruits. Des résultats similaires ont été publiés par de nombreux chercheurs comme Nwadukwe et Chude (1995) et Ayoub, Guertin et Smith (1995).

### **Effets de l'interaction azote-potassium sur la qualité interne des fruits**

L'analyse bifactorielle des données montre l'interaction hautement significative entre l'azote et le potassium en ce qui concerne la qualité interne des fruits. Du tableau 25, il ressort que la variation de la dose comme facteur indépendant, a eu des effets hautement significatifs sur la production et l'accumulation de matière sèche par les fruits. A la différence de ce qui a été observé au niveau du poids moyen des fruits, l'accroissement de la dose a entraîné une augmentation de la matière sèche jusqu'à la dose de 10 kg/ha. Au-delà de cette valeur, on a observé un effet dépressif de l'accroissement du niveau d'azote apporté. Par ailleurs, de manière générale l'accroissement du niveau de potassium appliqué a entraîné une augmentation du pourcentage de matière sèche des fruits. Ce résultat coïncide avec ceux publiés par Borkowski et Szwonck (1987).

Les valeurs les plus élevées de teneurs en solides solubles totaux ont correspondu aux combinaisons du potassium avec les plus faibles doses d'azote. Ceci montre la forte interaction entre l'azote et le potassium sur cet indicateur de la qualité interne des fruits ; car dans l'expérimentation 4, l'accroissement des doses d'azote a eu un effet positif sur ledit indicateur.

Dans les conditions de l'étude, il n'y a pas eu de réponse positive à l'application de l'azote en ce qui concerne les teneurs en solides solubles totaux dans les fruits. Ceci confirme les résultats de Maria Grela (1991) et Klein (1992) selon lesquels la teneur en solides solubles totaux dépend non seulement de l'apport d'azote, sinon également des conditions spécifiques de développement des plantes.

De manière générale et selon ce qui ressort du tableau sus-indiqué, pour des niveaux donnés d'azote, l'accroissement de la dose de potassium a augmenté l'acidité des fruits. Ce résultat coïncide avec celui publié par Klein (1992).

**Tableau 25** : Influence de l'interaction azote-potassium sur la qualité interne des fruits.

Traitement	M.S. (%)	Brix (%)	Acidité (%)
N <sub>60</sub> k <sub>0</sub>	4,14 g	4,61 a	0,33 c
N <sub>60</sub> k <sub>75</sub>	4,84 f	4,45 b	0,38 b
N <sub>60</sub> k <sub>150</sub>	5,06 c	4,61 a	0,42 a
N <sub>120</sub> k <sub>0</sub>	5,28 c	4,42 bc	0,34 c
N <sub>120</sub> k <sub>75</sub>	5,43 b	4,42 bc	0,42 a
N <sub>120</sub> k <sub>150</sub>	5,91 a	4,31 d	0,28 d
N <sub>180</sub> k <sub>0</sub>	4,95 e	4,41 c	0,32 c
N <sub>180</sub> k <sub>75</sub>	4,86 f	4,31 d	0,27 d
N <sub>180</sub> k <sub>150</sub>	4,84 f	4,33 d	0,27 d
Esx (N)	0.69 ***	0.75 ***	0.17 ***
Esx (K)	0.87 ***	0.63 ***	0.25 ***
Esx (N-K)	1.09 ***	1.23 ***	1.12 ***

(les moyennes avec des lettres identiques ne diffèrent pas significativement selon Duncan avec 5% de probabilité)

### **Effet des combinaisons azote-potassium sur les teneurs**

On observe qu'après 35 jours de semis, les teneurs étaient similaires dans tous les traitements. Ainsi, on obtient un accroissement des teneurs foliaires en azote et potassium dans les combinaisons N<sub>60</sub>k<sub>0</sub>, N<sub>120</sub>k<sub>75</sub>, N<sub>180</sub>k<sub>75</sub>, N<sub>180</sub>k<sub>75</sub> et N<sub>180</sub>k<sub>150</sub> ; et ceci jusqu'à 75 jours après le semis. Ce résultat pourrait se justifier par le fait que les plantes sont en pleine phase de croissance végétative. Après ces 75 jours, les teneurs foliaires en azote et potassium ont diminué de façon notable. Ceci est sans doute dû aux transferts de ces nutriments vers les fruits. Widders et Lorenz (1982), ont indiqué que les teneurs foliaires en ces éléments décroissaient d'environ 20 à 40% avec l'apparition des fruits de tomate.

Il importe de signaler que l'accroissement de la teneur foliaire en azote avec la combinaison N<sub>180</sub>k<sub>75</sub> a un résultat conforme à l'effet favorable du potassium sur l'absorption de l'azote. A ce propos, Barneix et Breteler (1984), ont affirmé que l'absorption de l'azote est stimulée par l'accroissement du potassium dans le bulbe humide du sol.

Quant au comportement des teneurs foliaires en phosphore, on observe un accroissement de façon générale desdites teneurs le long du cycle de vie des plantes. Clarholm et Rosengrenblinck (1995), ont publié des résultats similaires. Ce comportement des teneurs foliaires en phosphore se doit en grande partie à l'effet favorable de l'humidité permanente et constante qui est obtenue avec l'utilisation de la fertigation goutte à goutte à haute fréquence d'après Fardeau, Morel et Boniface (1991). Ces chercheurs, suite à une étude sur la cinétique du transfert des ions phosphates vers la solution du sol, ont montré que l'unique facteur capable de limiter la nutrition phosphatée des plantes était le flux.

Le comportement des rendements en fonction des teneurs foliaires en azote 75 jours après le semis montre que l'accroissement desdites teneurs en azote jusqu'à 2,79% de la matière sèche, correspond à une augmentation des rendements. Les valeurs des teneurs foliaires en azote supérieures à 2,79% de la matière sèche ont entraîné une diminution des rendements.

En ce qui concerne le potassium, on remarque que de 3,2% de la matière sèche, sont associées à une augmentation graduelle des rendements.

Les intervalles de valeurs critiques, selon les équations obtenues et tenant compte du critère de Ulrich (1991) selon lequel l'intervalle de valeurs critiques est associé à la zone de transition (90 à 100 % du rendement maximal) sont de 2,45 à 3,50 % de la matière sèche pour l'azote et de 3,00 à 3,40 % pour le potassium.

Les valeurs des teneurs foliaires en azote et en potassium obtenu 75 jours après le semis dans cette étude, sont quelque peu supérieures à celles publiées suite à des études sur la nutrition de la tomate à Cuba avec l'utilisation du système conventionnel d'irrigation et de fertilisation. Quant aux valeurs publiées par des chercheurs des pays développés comme Bar-Yosef et Sagiv (1982), Singh, Singh et Bhangari (1989) puis Nwadukwe et Chude (1995) entre autres, elles sont plus élevées que celles obtenues dans la présente étude. Ceci est fondamentalement dû aux potentiels de croissance, de développement et de production plus élevés des plantes de tomate dans ces pays.

## ***Evaluation financière***

### **Evaluation financière comparative de l'utilisation des différentes techniques**

L'utilisation du système de fertigation goutte à goutte dans la culture de la tomate amène à faire une évaluation d'efficacité financière dudit système par rapport aux systèmes d'irrigation goutte à goutte et par aspersion, tous deux avec l'application manuelle d'engrais. Pour ce faire, les rendements commerciaux obtenus dans l'expérimentation 1 ont été utilisés comme base de calcul.

On observe dans le tableau 26 que la valeur de la production avec la fertigation goutte à goutte est supérieure à plus de 30% à celle obtenue avec l'irrigation par aspersion. Ceci se justifie par le fait que les rendements obtenus avec la fertigation sont plus élevés que ceux obtenus avec l'irrigation par aspersion et application manuelle d'engrais. Quant aux coûts de production, ils sont plus élevés avec l'utilisation de fertigation goutte à goutte du fait des prix élevés des matériaux comme la tuyauterie et les gouttières. Nonobstant, le bénéfice obtenu avec l'utilisation de la fertigation goutte à goutte a été plus élevé que celui obtenu avec l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais. Ce résultat correspond à ceux publiés par de nombreux chercheurs parmi lesquels Letey et al. (1990).

Le résultat antérieur, uni au comportement de la variable "coût par unité" et les résultats obtenus suite à la l'expérimentation 1, montre que l'utilisation de la fertigation goutte à goutte dans les conditions de sols Ferrallitiques rouges est possible et rentable.

**Tableau 26** : Evaluation financière comparative des différents systèmes d'irrigation et fertilisation

Indicateur	Traitements		
	FR	RL + F	RA + F
Valeur de la production (pesos/ha)	7053,2	5303,2	5047
Coût de production (pesos/ha)	8502,9	3297,1	2813,9
Bénéfice (pesos/ha)	3550,3	2006,1	2233,1
Rentabilité (%)	101,35	60,84	79,35
Coût par peso produit (pesos)	0,49	0,62	0,55



Il est important de préciser que le bénéfice obtenu avec l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais a été plus élevé que celui obtenu avec l'irrigation goutte à goutte avec application manuelle d'engrais. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que le surplus de rendement obtenu avec l'irrigation goutte à goutte et l'application manuelle d'engrais par rapport à l'irrigation par aspersion n'est pas suffisamment élevés pour couvrir les coûts de production liés à l'irrigation goutte à goutte. Ce résultat démontre la nécessité d'incorporer les engrais à l'eau d'irrigation lorsque l'on a installé le système d'irrigation goutte à goutte. Cette analyse financière renforce les résultats agronomiques obtenus.

### **Evaluation financière des différentes combinaisons N-K**

La comparaison des indicateurs ci-après a été faite. Il s'agit du bénéfice, de la rentabilité et du coût par peso produit de toutes les combinaisons azote-potassium étudiées ainsi que la combinaison qui a eu le meilleur comportement d'après l'équation mathématique antérieurement déterminée. On observe dans le tableau 27 que le bénéfice le plus élevé a été obtenu avec la combinaison de 163 kg/ha de N et 98,7 kg/ha de  $K_2O$  avec une rentabilité de 141,25% et un coût de 41 centimes par peso produit. Quant aux combinaisons expérimentales, 180 kg/ha de N avec 75 kg/ha de  $K_2O$  s'est révélée être la combinaison la plus rentable. On remarque, par ailleurs, que pour les doses d'azote faible (60kg/ha) et élevée (180 kg/ha), leur combinaison avec 75 kg/ha de  $K_2O$  ont été plus rentables que les combinaisons avec 0 et 150 kg/ha de  $K_2O$ . En ce qui concerne la dose moyenne d'azote (120 kg/ha), l'accroissement de la dose de potassium a entraîné une réduction de la rentabilité.

**Tableau 27** : Evaluation financière des différentes combinaisons azote- potassium

Traitement	Coût	valeur de prod.	Bénéfice	Rent. (%)	Coût / peso
	(Pesos/ha)				
N <sub>60</sub> k <sub>0</sub>	2703,0	5208,9	2505,9	92,70	0,51
N <sub>60</sub> k <sub>75</sub>	2979,1	6594,0	3614,9	121,94	0,45
N <sub>60</sub> k <sub>150</sub>	3060,5	6435,8	3375,3	110,28	0,47
N <sub>120</sub> k <sub>0</sub>	3029,0	6918,5	3889,5	128,40	0,43
N <sub>120</sub> k <sub>75</sub>	3775,3	7598,0	3822,7	101,25	0,49
N <sub>120</sub> k <sub>150</sub>	3875,6	7521,3	3645,7	94,06	0,51
N <sub>180</sub> k <sub>0</sub>	3610,1	7460,7	3850,6	106,66	0,48
N <sub>180</sub> k <sub>75</sub>	3792,7	9068,3	5275,6	139,09	0,41
N <sub>180</sub> k <sub>150</sub>	3904,0	8750,1	4846,1	124,13	0,44
N <sub>163</sub> k <sub>98,7</sub>	4089,4	9865,7	5776,3	141,25	0,41

\* Combinaison calculée à partir de la simulation de la réponse des plantes.

## Conclusions

Après l'analyse des résultats obtenus, les conclusions ci-après, valables principalement pour les variétés et conditions de l'étude ont été tirées.

1. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec l'incorporation des engrais dans l'eau d'irrigation goutte à goutte (fertigation). Les surplus de rendement par rapport à l'irrigation goutte à goutte et par aspersion avec toutes deux l'application manuelle d'engrais ont été de 30 et 60% respectivement affectée par les différentes techniques.
2. Les plantes sous fertigation goutte à goutte ont présenté les meilleures valeurs de croissance végétative en comparaison avec l'irrigation par aspersion et application manuelle d'engrais. Par ailleurs, la fertigation limite l'incidence des mauvaises herbes.
3. Les teneurs du sol en azote minéral et potassium (0-20 cm) ont été plus élevées sous fertigation goutte à goutte que sous irrigation goutte à goutte et par aspersion, toutes deux avec l'application manuelle d'engrais. De même, les extractions et exportations de NPK ont été plus élevées sous la fertigation goutte à goutte.
4. Le coefficient d'assimilation des nutriments NPK et l'efficacité agronomique de la fertilisation ont été plus élevés sous la fertigation goutte à goutte.
5. La réponse de la tomate à des doses croissantes d'azote sous la fertigation goutte à goutte a été forte. Les doses maximales agronomiques et économiques ont été respectivement de 160 kg/ha et 155 kg/ha. La dose de 240 kg/ha d'azote s'est révélée excessive pour les tomates.

L'expression  **$Y = 0,81 \exp [(X-157,8)^2 / - 19270]$**

avec  **$R^2 = 0,99$**  a été l'équation mathématique ayant décrit le mieux la réponse des cultures.

6. Il y a eu de fortes interactions azote-potassium sur le rendement de la tomate. La zone délimitée par les doses de 160 et 180 kg/ha d'azote avec 75 et 100 kg/ha de  $K_2O$  a été celle de meilleures réponses. Dans

cette zone, le point de coordonnées 163 kg/ha d'azote et 98,7 Kg/ha de potassium correspond au rendement le plus élevé (46,19 t/ha).

7. L'analyse foliaire à 75 zones après le semis est un outil important pour connaître l'état nutritionnel de la tomate. Ceci permet d'apporter d'éventuelles corrections afin de rattraper les meilleurs rendements.  
Les valeurs foliaires d'azote entre 2,45 et 3,20 et de potassium entre 3,00 et 3,45% de matière sèche ont correspondu aux rendements les plus élevés.
8. Les teneurs foliaires en NPK ont présenté une tendance ascendante durant la croissance et le développement des plantes.
9. L'utilisation de la fertigation goutte à goutte chez la tomate est faisable aussi bien du point de vue agronomique qu'économique. Le bénéfice obtenu a été de 3550,3 pesos/ha contre 2233,1 pesos/ha pour l'irrigation par aspersion avec application manuelle d'engrais.

## Recommandations

1. Introduire la technique de fertigation goutte à goutte dans la culture de la tomate comme moyen d'augmenter les rendements, améliorer la taille des fruits et faire un usage plus efficient de l'eau et des engrais.
2. Pour des rendements potentiels inférieurs à 44 t/ha, ne pas dépasser la dose de 180 kg/ha d'azote ni 100 kg/ha de  $K_2O$  avec des teneurs d'environ 0,90 mol/kg de potassium interchangeable dans le sol.
3. Utiliser les analyses foliaires pour le contrôle de l'état nutritionnel de la tomate.
4. Conduire des essais de confirmation des présents résultats avant l'introduction de cette technique au Bénin.

## Références bibliographiques

Abdalla. A.A. et Verkerk. Temperature and nitrogen nutrition in relation to flowering and fruiting tomatoes. *Neth Journ Agri. Sci.* 18, 1970.

Abrams, R.; L. Cruz et F. Julian. *Effect of fertilization Agri. Univ Puerto Rico.* 59 (1), 1975.

Adams, P., G. W. Winsor and J. D. Donald. *Effects of nitrogen potassium and sub-irrigation on the yield, quality and composition of single-truss tomatoes. Journ. Hort. Sci.* 48 (1): 123-133, 1973.

Agui, I., M. Gomez et L. Recalde. Efecto de la proporción de K Ca y Mg en la solución nutritiva sobre el crecimiento, la absorción y distribución de macronutrientes N, S y P en plantas de tomates. *Agroquímica* 22 (5-6), 1978.

Aliev, A. Cosecha, calidad et transportación de los tomates y pepinos en relación con el empleo de fertilizantes. *Tematich S.B. trudov. AZNLI. O. Bak,* 1980.

Almaquer, J., A. Pérez et C. González. *Fertilización NPK del tomate de transplante var. Campbell-28. Resúmenes. V Seminario Científico INCA.* (5 : La Habana), 1985.

Amo, M. L.; E. Balsalobre; H.J. Martin; M. Ruiz, *Instalación de Riego Localizado : Aspectos técnicos. / M.L. Amo.../ et al. / . En : Fertilización localizada. / Madrid : Editor Científico, 1991.*

Amor, F. del ; A. León ; F. García, J. Soler ; E. Barba, M.C. Ruiz Sánchez ; M.J. Sánchez Blanco. *Estudio de la dinámica del N(N03), P y K en suelos regados por goteo. / Del Amor.../ et al./ Simposio Nac. de Fertilización en Riego Localizado. (1 : 1987 junio 12 Almería), 1987.*

Andersen. P.C., D.W. Buchaman et L.G. Albrigo. *Water relations and yields on Three Rabbiteye Blueberry Cultivars with and without Drip Irrigation. Journ. Amer. Scoc. Hort. Sci.* 104 (6) : 731-736, 1979.

Anderson. M.N., C.R. Jensen et R. Lösch. Interaction of potassium and drought in barley-yield, water-use efficiency and growth. *Potash Review.* 4, 1994.

Andeterro, R. Water use, transpiration coefficient and water use efficiency of maize and soybeans as affected by increasing rates of potassium. *Potash Review.* 2, 1990.

Angelov, L. *The effect of mineral fertilizers in certain feature of determinate tomato cultivars. Gradinarka I Lozarska Nanka* 2 (1): 71-76, 1974.

Arzola, N. *Fertilización de los cultivos*, /N. Arzola. La Habana : Ed. Revolucionaria, 1979.

Atkinson. D. *The effect of trickle irrigation on the distribution of root growth and activity in fruit trees*. En : 2de Congreso Latinoamericano de microirrigación. Barquisimeto. Venezuela. 1981.

Ayoub, M., S. Guertin et D.L. Smith. *Nitrogen fertilizer rate and timing effect on bread wheat protein in eastern Canada*. *Journ. of Agron. and Crop Sci.* 174 (5). 1995.

Azzam, H. et G. Samuels. *Yields of tomatoes as influenced by application on Filterpress cake and starter solutions*. *J. Agri. Univ. Puerto Rico.* 48 (1), 1964.

Bacon, P.E et B. G. Davey. *Nutrient availability under trickle irrigation : II Mineral Nitrogen*. *Soil Sci. Am. Jour.* 46, 1982.

Bakker, J. M., J. H. slangen; W. Glas. *The comparative investigation in the effect of fertigation and of broadcast fertilization on the yield and nitrate content of lettuce*. *Netherlands J. Agri. Science* (32), 1984).

Barneix, A.J. et H. Breteler. *Función de  $K^+$  et  $Na^+$  en la absorción, translocación de  $NO_3^-$  en plantas de trigo*./A.J. Barneix, H. Bretler. En : *Proc. Inter. Coll. for the Optimization of Plant Nutrition* (6 : 1984 Francia), 1994.

Bar-Yosef, B. Sagiv. *Response of tomatoes to N and water applied via a Trickle Irrigation System-I*. *Nitrogen. Agronomy Journal.* 74, 1982.

Bénin, Ministère du Développement Rural. Bulletin Spécial. République du Bénin – décembre 1995.

Bhella, H.S. *Tomato Response to Trickle Irrigation and Back Polyethylen Mulch*. *Jour. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113 (4), 1988 deficiency on water relations and photosynthesis of the tomato plant. *Plant and Soil* 127: 137-139. 1990.

Beltrán, R; Muñiz, O. ; Querel Mireya; Rodriguez, A.; Alfonso, L. ; Muñoz, R. ; Vega, M. *Actualización et adecuación del registro de fertilidad de los suelos de la Provincia La Habana: Informe Mimeografiado, Archivo, Instituto de Suelos, MINAGRI, 1995.*

Besford, R. T. and R. Haw. *Phosphorus nutrition on tomato growth*. *Plant and Soil* 47 (1). 1975.

Besford, R.T. *Effect of P nutrition on a peat on tomato*. *Plant and soil* 51 (3). 1979.

Bolarin, M. C. ; Cano, E. A. : Perez-Alfacea, F. ; Caro, M. *Fertirrigación Localizada*. Editor científico. Madrid, España. 1991.

- Bogomolova, G.V. *Effect of nutrition conditions on yield and quantity of tomato fruits under irrigation in khakasia. Agrojimiya.* 12 (58). 1976.
- Borkowski, J. and E. Szwonek. *Effect of potassium and magnesium on the quality of tomato fruits. Soils and Fertilizers.* 50 (8). 1987.
- Borroto, Maria. *La dinámica del Potasio en suelos Ferralíticos Rojos compactados dedicados al cultivo de la papa. Maria Borroto. Tesis de Grado (Dr en Ciencias Agrícolas), UCLV, 1987.*
- Bralts, V. F. *Field Evaluation of drip irrigation. V. F. Bralts, D.M. Edwards, Chicago: Amer. Soc. of Agri. Eng., 1983.*
- Bremner, J. M. *Total Nitrogen. Method of soil Analysis. Agronomy J. M. Bremner. Madison Wis. 1965.*
- Bresler, E. *Analysis of trickle irrigation with application to design problems. Irrigation Science (1). 1978.*
- Brunet, R. *Estudio de algunos modelos de fertilización en los suelos Ferralíticos Rojos Compactados. R. Brunet, G. Granda, En : Jornada Científica Estudiantil. Fac de Agron. Univ. de La Habana, Cuba, 1974.*
- Brunet, R. *La producción de tomates en condiciones hidroponía. R. Brunet, N. Valle, E. Acosta. La Habana : Ed. Científico-Técnica, 1991.*
- Bucks, D. A. ; F. S. Nakayama; A. W. Warrick. *Principles practices and potentialities of trickle (Drip) irrigation. Advances in Irrigations. 1. 1991.*
- Cabrera, A. I. Et P. P. Hernández. *Riego por goteo CIDA. Boletín de Reseñas. 1. 1979.*
- Cadahía, C. et V. Hernando. *Variación del contenido mineral de las tomateras durante el ciclo del cultivo. Rev. Agron. Y Técn. de los Alimentos. 6 (3). 1966.*
- Cadahía, C. *Criterios para la aplicación de fertilizantes en Riego Localizado. Fertilización. 100. 1989.*
- Cairo, P. Suelos P. Cairo, G. Quintero. *La Habana : Editorial Pueblo et Educación. 1980.*
- Camacho, E. *Etude des Sols des plaines karstiques de la région occidentale de Cuba. Etude d'une zone ouverte sur la mer située entre San Nicolás de Baris et Guanajay et particulièrement des sols Ferrallitiques Rouges compacts. Tesis de Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas, ORSTOM, 1980.*
- Cardoza, H. Consumo et dinámica de absorción de los nutrientes NPK en tomate var. Campbell-28. H. Cardoza, Maritza Chailloux, A. Núñez. En : Resúmenes XX Seminario Científico-Técnico. E.E.N.V. "La Renée", 1984.



Carpaena, O. ; P. Zornoza et R.O. Carpaena. *Influencia de la relación  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$  en la nutrición mineral de la planta de tomate. Anales de Edafología et Agrobiología. 42 (10). 1983.*

Carpaena, O. Aplicación et manejo de fertilizantes. *Fertirrigación. Problemática actual en el uso de los fertilizantes. XVIII Jornadas de Estudios (Zaragoza). I.T.E.A. vol. – Extra. n° 6. 1986.*

Cassagnes, P. *Leaf mineral composition of apple trees irrigated by microjets or by drip irrigation. / P. Cassagnes, S. Bazailles, P. Fourcade. En : VI Inter. Coll. for the optimization of Plant Nutrition. Proceedings. Montpellier, 1984.*

Chen, J.S. et A.F. Mac Kenzie. *Effects of rates and placement urea and KCl on soil nitrogen and potassium and corn dry matter yield. Potash Review 4. 1994.*

Clarholm, M. and U. Rosenerenbrinck. *Phosphorus and nitrogen fertilization of a Norway spruce forest-effect on needle concentrations and acid phosphatase activity in the humus layer. Plant and Soil 175 (2) : 239-249. 1995.*

Cline, M.G. *Soil of the Central Plateau of Brazil and extension of results of field research conducted near Planaltina. Federal District to them. M.G. Cline, S.W. Buol. New York : Cornell University. 1973.*

Cornforth, I.S. *A review of work on N in West Indian-Soils. Trop. Agri. 51 (2). 1974.*

Csizinsky, A.A. and D.J. Schuster. *Response of staked, fresh market tomatoes to reduce input of fertilizers and insecticides in Florida. Hort. Sci. 15 (3). 1980.*

Cuba, MINAGRI. *Seminario Para la Evaluación del Mapa Nacional de Suelos Escala 1 : 25000. 1981*

Cuba, MINAGRI. *Instructivo Técnico para el cultivo del tomate. Dirección Nacional de Cultivos Varios, MINAGRI. La Habana, 1984.*

Cuba, Comité Estatal de Precios. *Formulario para la Presentación y Aprobación de Nuevos Precios (Productos industriales), 1988.*

Cuba, Dirección de Contabilidad, Finanzas et Precios Indicativos del Mercado mundial en productos seleccionados. Insumos Agropecuarios Producción, 1996.

Dendas, J. and J. Coppin. *La culture maraichère dans les plaines alluviales du sud Katanga. Problèmes Sociaux Congolais 67. 1964.*

Diaz, E. ; G. González; A. Avila ; A. Maestrey et H. Cardoza. *Manejo de la fertilización en tomate de invierno. Resultados preliminares. E. Diaz... et al. En : Resúmenes 2do Semi. Cien. Téc. Est. Exp. "La Renée". La Habana, Cuba, 1984.*

- Dinchev, D. Agroquímica. D. Dinchev. La Habana : Instituto del Libro, 1972.
- Djègui, N. ; Boissezon, P. et Gavinelli Evelyne. *Statut organique d'un sol ferrallitique de Sud-Bénin sous forêt et différents systèmes de cultures. Cah ORSTOM sér. Pédol. XXVII (1) 5-22. 1992.*
- Duncan, D. E. multiple range and multiple f. text. Biometrics, 11. 1955.
- El-Sayed, M. A. ; P. Ludders. Efecto quee ezerce el K et los portaïnjertos sobre el consumo de agua por los manzanos con Sección 8 (9). 1984.
- Everett, P.H. Effect of nitrogen and potassium rates on fruit, yield and size of mulch grown staked tomatoes. Proc. Fla. State Hort. Soc. 89 : 159-162. 1976.
- F.A.O. Anuario de Producción. 44. 1993.
- F.A.O. Anuario de Producción. 43. 1995.
- Fardeau, J.C. ; C. Morel et R. Boniface. Cinética de transferencia de iones fosfatos del suelo hacia la solución del suelo : parámetros característicos. Agronomie 11 (9). 1977.
- Fawusi, M. O. A. Influence of plant density and time of fertilizer application on growth characteristics nutrient uptake and yield of tomato. Science Hort. 7 (4). 1977.
- Feign, A. ; J. Letey and W.N. Jarrel.. Nitrogen utilization efficiency by drip irrigated celery receiving preplant on water applied N fertilizer. Agron. Jour. 74 (6). 1982.
- Fernández, P.D. [et al.] Nutricae mineral de hortalizas. XXV absorcao mineral de nutrientes pelo tomateiro. En Cultivoteiro. Anais de Escola Superior de Agricultura "Luis Queiroz". 32 : 595, 1975.
- Fernández, M. ; A. Borges Pérez. Algunas consideraciones sobre la fertilización en Riego Localizado. M. Fernández, A. Borges. En : Simposio Nacional de Riego Localizado (1 : 1987 : La Laguna), 1987.
- Fischer, F. Nuevos métodos para la evaluación de productos herbicidas en los cultivos económicos de Cuba. F. Fischer. Informe Científico-Técnico. 74. nov, 1978.
- Fischer, K. I. Effects of nitrogen supply in nutrient culture on fruit yield in the first truss of the tomatoes. Journ. Hort Scien. 44. 1981.
- Fonseca, R.; H. Cardoza et P. Verdecia. Estudio del fraccionamiento y época de aplicación del N en el cultivo Resúmenes 2do Sem. Cien. Téc. Exp. de Nutric. Veg. "La Renée". La Habana, 1984.

Ford, H. W. Water quality test for low volumen irrigation. Lake Alfred AREC Research Report C.S. (79). 1980.

Frie, A. El K en los suelos de las zonas cálidas secas de Colombia. A. Frie. En : Memorias del V coloquio de Suelos, 1978.

Fundora, O. ; N. Arzola et J. Machado. Agroquímica. O. Fundora, N. Arzola, J. Machado. La Habana : Pueblo y Educación, 1983.

García, P. T. Fertilización del tomate con NPK y elementos menores. P.T. Gracia. TGC. Univ. Nac. De Colombia, 1965.

Garrison, A.S., G. A. Taylor and W.O. Drinkwater. Effects of time and rate nitrogen application to plants on the quality of tomato juice. Proc. Soc. Hort. Sci. 91, 1967.

Geus, L.G. de Fertilizer Guide for Tropical and Subtropical Farming. L.G. de Geus. Zurich : Centre d'Etudes de l'Azote, 1967.

Gimenez, M. Abonos sólidos para fertirrigación Localizado por goteo. M. Giménez. En : Fertirrigación Localizada. Murcia Serie Congresos. 3 Murcia, 1991.

Goldberg, O. Drip irrigation : principles design and agriculture pratics. O. Goldberg, B. Gormat; D. Rimon. Drip Irrigation Scient. Israel, 1976.

Gómez, R. La dinámica del fósforo y su relación con la nutrición fosfórica de la caña de azúcar y el arroz en algunos Suelos Ferralíticos. R. Gómez. Tesis de Grado Científico. La Habana, 1987.

Gonzalez, W. Estudio de niveles NPK en tomate. Trabajo de Diploma. Univ. Central "Martha Abreu". Villa Clara, Cuba. 1972.

Gonzalez, A. ; O. Rodriguez ; H. Cardoza ; A. Lorenzo ; P. Medina et J. Padrón. Estudio de niveles de NPK en tomate (*L. esculentum*) var. Campbell-28 A. Gonzalez... et al En: Resúmenes Sem. Cien. Téc. Est. Exp. de Nutrición Vegetal "La Renée" (2 : 1984 : La Habana), 1984.

Greenwood, B.J. and A. Barnes. A theeretical model the decline in the protein contain in plants during growth. Journ Agri. Sci. Comb. 91:461-466, 1978.

Greenwood, D.H. ; A. Barnes; K. Liu ; J. Hunt; T. Clerver and S. Loquers. Relation between the critical concentration of N, P and K in 17 diferents vegetables crop and duration of growth. Journ. Sci Food Agri 31 (12), 1980.

Grela, Maria. Plantas por nido y Fertilización nitrogrenada del tomate en las condiciones de suelos Ferralíticos Cuarcíticos amarillos. Maria Grela. Tesis de Grado Científico (Dr en Ciencias Agrícolas). Pinar et Rio, 1991.

Gros, A. Abonos. Guia Práctica de la Fertilización. Andrés Gros. La Habana : Ed. Rev. 1966.

Guenkov, G. Fundamentos de la Horticultura Cubana. G. Guenkov. La Habana : Inst. Cub. del Libro. 1969.

Guerrero, R. El diagnóstico químico de la fertilidad de los suelos. R. Guerrero. En : Fertilidad de suelos. Diagnóstico y control. Scoc. Colombiana de la Ciencia del Suelo, 1980. p : 141-199.

Gupta, A. et G.G. Rao. Notes on the response of spring planted tomato to irrigation and N. India Journ. of Agri. Sci. 48 (3) 1978.

Gutierrez, J. et J. Garcia. Différentes classifications de la calidad del agua para el Riego. J. Gutierrez, J. Garcia. La Habana : Inst. de Hidroeconomía, 1974.

Guzmán, J. ; Hortencia Cardoza, Marisa Chailloux, Albina Maestrey, A. Lewis, C. Illas et D. Balmaseda Fertilización de las hortalizas. Informe Final del Tema 03-21. Inst. Inv. de Suelos y Agroquímica. Ministerio de Agricultura. Cuba. 1979.

Habib, R. Algunas reflexiones sobre problemas de fertilización en zonas de regadio. Problemática actual en el uso de fertilizantes. XVII Journades de estudio (Zaragoza). Vol. Extra. nº6. 1986.

Hann, B.R.; V.F. Bralts and C.D. Kesner. Controlled N application through injection in trickle irrigation systems. Paper Amer. Soc. of Agric. Eng. 85. (2078). 1985.

Hernández, J. M. El Riego por Goteo. Ministerio de Agricultura. Madrid. España. 1977.

Hernández, A. Clasificación genética de los suelos de Cuba. Alberto Hernández et al. La Habana Editorial Academia, 1975.

Hesse, P.R. A text book of Soil Chemical Analysis. John Murray. London. 1971.

Hildmann, H.E.;T. Kappler and M. Bohme. Garanteed high crop of drip-irrigated, container – grown vegetable. Experience at the Early Vegeable Center Wichelm. Wplff, Dresden. Gartenbau 32 (12). 1985.

Hipp, B.W. Phosphorus requeriment for tomatoes as influenced by placement. Agron. Journ. 62 (2). 1970.

Iturri, F. Q. ; C. V. Suarez et L.C. Lévand. Suelos, sus propiedades y manejo. Ministerio de la Agri. Bolentin Técn. (62). Colombia. 1965.

Izquierdo, P. et al. El complejo de adsorción en una secuencias de suelos Ferralíticos Rojos en las alturas del cacahual, Cuba. *Cultivos Tropicales* 12 (3). 1991.

Izquierdo, R. ; J. Garcia; Ma Estela Castañeira et A. Cuesta. Manual de Prácticas de Laboratorio de Agroquímica. Dpto de Ediciones del I.S.C.A.H. San José de las Lajas. La Habana, 1988.

Jackson, M. M. Análisis Químicos de Suelos. M.M. Jackson. Barcelona : Editora Omega, 1964.

Jaramillo, V.J.; A.R. Muñoz et P. F. Cardona. Respuesta del tomate a la fertilización con NPK y varios elementos menores en suelos aluviales del valle del Cauca. *Rev. I.C.A.* 13 (3). 1978.

Jaramillo, V.J. Respuesta a la aplicación foliar de algunos elementos menores. *Bibliografía Comentada sobre Hort.* ICA. 1982.

Jones, J. P. and R.L. Fox. P nutrition of plants influenced by Mn and Al uptake from on oxisol. *Soil Sci.* 126 (4). 1978.

Karmeli, D. J. Keller. Trickle Irrigation design. Rain Bird. Glendora. California. 1974.

Kdrev, T. and V. Georgeva. Interraction of Ammonium with K, Na, Ca and Mg during uptaking by tomato plants. *Fisiol. Rast.* 4 (1). 1978.

Keng, J. C. W.; T. W. Scott and M. A. Lugo-López. Fertilizer management with drip irrigation in oxisol. *Ann. Agron.* 71 (6) 1979.

Kirolly, Z. Plant disease resistance as influenced by biochemical effect of nutrients in fertilizers. In: *Fertilizer use and plant health. Proc. 12 th coll. Int. K. Inst. Bern.* 1976.

Kirby, E. A. and K. Mengel. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea or ammonium nutrition. *Plant Physiol* 42 (1). 1967.

Klein, I. The effects of potassium applied by drip irrigation on growth, fruit quality and storage of apples on a soil with marginal Mg content. *Potash Review* 1. 1992.

Labrada, R. Metodología sobre malas hierbas. R. Labrada, F. De la Osa et Y. Geshtovt. La Habana : Inst. de Inv. Sanidad Vegetal, 1979.

Lachover, D. The effect of potassium on "Roma" variety of processing tomato, with special reference to potassium uptake, yield and quality. *Qualitas Plantarum et Materiae Vegetabiles* 21 (3) : 165-177. 1972.

Laher, M. and et Avnimelch. Nitrification inhibition in Drip Irrigation System. *Plant and Soil.* 55. 1980.

- Leckckvii, A. Interactions between water and phosphate and potash fertilizers. Nutrient balances and arid regions. A. Leckckvii. Berna : Int. Potash Inst, 1983.
- Leffingweel, R. J. Irrigación, nuevos procesos en Hawai. Sugar Azucar. 69 (10). 1974.
- Legaz, F. Interaction between water amounts and fertilizers applied through a drip irrigation system in Clementine and Satsume mandarins. F. Legaz. D. G. de Barreda. En : Proc. Int. Soc. Citriculture 2. 1981.
- León, Maria e I. Delibaltov. Evapotranspiración máxima y real del tomate. Cien. Y Técn. de la Agri. Riego y Drenaje. 4 (1). 1981.
- Letey, J. et al. An economic analysis of irrigation systems. Irrigation Sciences 11 : 37- 3. 1990.
- Locascio. S.Y et A.G. Smajstrla. Drip Irrigated Tomato as affected by water quantity and nitrogen and potassium application timing. Proc. Of the Florida State Hort. Soc. 102. 1989.
- López, T. Balance del nitrógeno en el suelo. CIDA Boletín de Reseñas. Suelo y Agroquímica, 1985.
- Luh, B. S. ; N. Ukai and J. I. Chung. Effect of nitrogen nutrition and day temperature on composition, color and nitrate in tomato fruit. Journal of Food Science. 38 (1) : 29-33. 1973.
- Madrid. R. El sistema de riego localizado : Introducción. R. Madrid. En : Fertirrigación localizado. Murcia Serie Congresos. 3. Murcia. 1991.
- Maestrey, Albina et al. Extracción de nutrientes por el tomate cultivado en primavera. Consumo de NPK durante el ciclo del cultivo. Ciencia y Técnica en la Agricultura : Suelos y Agroquímica. 10 (2), 1987.
- Mackmur, A. ; G. C. Gerloff and W.H. Gabelman. Physiology and Inheritance of Efficiency in Potassium Utilization in Tomatoes Grown under Potassium Stress. Journ. Amer. Soc. Hort. Sci. 103 (4) : 545-549. 1978.
- Marin, M. G. Recomendaciones tentativas para la fertilización y encalado de varios cultivos de acuerdo con análisis de suelos. Primera aproximación. Rev. Inst. Colombiano Agrop. 3 (2). 1968.
- Marin, M. G. et P.T. Gómez. El análisis de suelo y las recomendaciones de fertilizantes y cal. I. C. A. Boletín Técn. 34. 1975.

- Martin. P. Distribución del potasio en plantas transporte a larga distancia y Distribución del potasio en plantas. *Potash Review* 4. 1989.
- Martini. J. A. Caracterización del estado nutricional de los principales latosoles de costa Rica mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. *Turrilba*. 20 (1). 1970.
- Medina. J.A. Riego por goteo. J.A. Medina. 2da ed. Barcelona, 1981.
- Menary, R.C. Studies on phosphorus nutrition on the tomato. Ph. D. Thesis, Univ. of Queensland. Australia. 1967.
- Menary, R.C. and J. Van Staden. Effect of phosphorus nutrition and Cytokinies on flowering in tomato. *Austr. journ. Plant. Physiol.* 3(2). 1976.
- Morard, P. Diagnostique de l'état nutritionnel de la tomate. *Analyse Veg. dans le contrôle de l'Alimentation des Plantes*. Paris. 1984.
- Mottram, R. Influencia que ejerce el potasio sobre las relaciones planta-agua del maiz. *Proc. South African Soc. of Crop Productions Congress*. 24. 1985. suráfrica.
- Narong, Ch. Plant response of tomatoes to P and K under greenhouse conditions. *Diss. Abs. B*. 40 (8). 1980.
- Navarro, A. et S. J. Locascio. Influence of population, density, row spacing and fertilizer rate on the single harvest yield of fresh market tomato. *Pro. Fla. State Hort. Soc.* 84. 1971.
- Nielsen, G.H.; P.B. Hoyt and D. Nielsen. Soil Chemical Changes associated with NP-Fertigated and drip irrigated high-density apple orchards. *Canadian Journ. of Soil Science* 75 (3). 1995.
- Nilsson. L.O. and K. Wiklundo. Nutrients balance and P,K, Ca, Mg, S and B accumulation in a Norway spruce stand following ammonium sulphate application, fertigation, irrigation, drought and N – free – fertilization. *Plant and Soil* 169, 1995.
- Nwadukwé, P.O. et V.O. Chude. Response of tomato to nitrogen fertilization and irrigation frequencies in a semi-arid tropical soil. *Fertilizer Research* 40 (2) 1995
- Ortega, E. Selección de métodos para determinación de P disponible y estudio de la fijación en algunos suelos. Tesis de Especialización. Univ. de la Habana. 1975.
- Papadopoulos, A. P. Cropping in soil with drip irrigation. Growing greenhouse tomatoes in soil and soilless media. 1991.

- Palevich, D. the effect of manure and fertilizer treatments of the yields of winter tomatoes in the Western Negev. *Israet Journ. Agr. Res.* 15 (2). 1965.
- Pesaud, N.; S.J. Locascio et C.M. Geraldson. Effect of rate and placement of N and K on yield of mulched tomato using different irrigation methods. *Proc. Fla. State Hort. Soc* 89, 1976.
- Phene, C. J.; D.C. Sanders. High frequency trickle irrigation and row spacing. Effects on yield and quality of Potatoes. *Agron. Journ.* 68 1976.
- Phillips, I.R.; A.S. Black et K.C Cameron. Effect of cation exchange on the distribution and movement of cations in soils with variable charge II. Effect of lime or phosphate on potassium and magnesium leaching. *Fertilizers Research* 31-46 1988.
- Picha, D.H. and C.D. and C.D. Hull. The influence of cultivar and K nutrition on the susceptibility of tomato fruit, to bacterial induced Graywal. *Hort. Sci.* 15 (3). 1980.
- Pizarro. F. Riegos localizados de alta frecuencia. Mundi Prensa. Madrid, España. 1987.
- Ragimova, A. Influencia de diferentes dosis de fertilizantes potásicos en la cosecha y calidad de los tomates. *Referativnii zhurnal. Serie 13 (5) : 26.* 1981.
- Rajagopal. V. and I.M. Rao. Changes in the endogenous level of auxines and gibberellin-like substances in the root apices of nitrogens deficient tomato plants. (*Lycopersicum esculentum* (Mill)). *Autr. Journ. of Bot* 22 (3) 1974.
- Ramos, C.; J. R. Castell; B. Gómez de Barreda. *Fisiología Vegetal.* 85 Univ. Polit. de Valencia. 1987.
- Randawa, K. S. ; K.S. Nandpuri et D. Singh. The effect of NP and K on the growth and yield of tomato cultivars. *Veg. Sci.* 4 (1) 1977.
- Rincón S. Fertirrigación en cultivos hortícolas. S. Rincón. En : *Fertirrigación Localizada.* Murcia, Serie Congresos. 3 Murcia, 1991.
- Rivera, R. et Eolia Treto. Influencia de la fertilización-N y el tipo de planta cultivada sobre la dinámica de los proceso minerales del nitrógeno en suelo Ferralítico Rojo compactado. *Cultivos Tropicales* 11 (2) : 71-79. 1989.
- Rivera, R. Nutrición y balance del fertilizantes nitrogenado (1N) en plantaciones de cafeto sobre suelo Ferralítico Rojo en Cuba *Cultivos Tropicales* 13 (1) : 15-22. 1992.
- Sánchez, A. A review of soil research in tropical latin America. *North Carolina agri. Tech. Bull.* (219) 1977.



Sánchez, Ma. P. Evaluación de la distribución de nutrientes en la planta de tomate en dos estados de su ciclo vegetativo. *Anales de Edafología y Agrbiología* 41 : 2-4, 1982.

Saxena, G. K. ; S. J. Locascio y J. B. Lucas. Effect of N, P and rates on response of cabbage and tomato grown on a coastal clay soil of Guyana. *Trop. Agri.* 52 (2), 1975.

Segull, R. H.; A. T. Dow and C.M. Geraldson. Effect of fertilizer components on yield, ripening and susceptibility of tomato fruit to postharvest soft rot. *Fla State Hort. Soc. Proc.* 90, 1977.

Serrano, Z. Situación actual del riego Localizado y Fertirrigación en la Hortofloricultura andaluza. Problemas y soluciones. *Acteas. I Simp. Nac de Fertilización en Riego Localizado.* Almeria, 1987.

Singh, S. D.; Y. V. Singh; R.C. Bhandari. Tomato yield as related to drip lateral spacing and fertilizer application on total and wetted area basis. *Canadian Journ. of Plant Science.* 69 (3) 1989.

Sobulo, R.; A. Fayemi and A. Agboala. Nutrient requirements of tomatoes in S.W. Nigeria. I effect of N, P and K on yields. *Exp. Agric.* 11 (2). 1975.

Sobulo, R. and K. E. Jaiyeola. Influence of soil organic matter on plant nutrition in Western Nigeria. *Soil Organic Matter Studies. Proceedings of a Symposium by IAEA / FAO.* Braunseh. Viena.1977.

Suai, A.; P. Krishnamoorthy and S. Loganathan. Uptake of nutrient elements in certain crops as influenced by root cation exchange capacity. *Mysore Journ. Agri. Sci.* 9 (4). 1975.

Sweeney. D.W. et al. Tomato yield and Nitrogen Recovery as influenced by Irrigation Method, Nitrogen Source and Mulch. *HortScience (Alexandria)* 22 (1): 27 – 29.1982.

Swiader, J.M. and R. O. Morse. P solutio concentration for production of tomato, pepper and egg plant in minesoils. *Journ. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107 (6). 1982.

Tomic-Sofo, A. et B. Saciragic. The dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium accumulation in déferents organs of tomato. *Radovi Poljoprivrednog Fakultate Univerziteta u Sarajevu.* 19 (21); 47-56. 1970.

Tyler, B. micronutrient report. *Agribusiness News.* April, 1972.

Uexcull, Von H.R. Tomato: nutrition and fertilizer requirements in the tropics. I *inter. Symp. on Tropical Tomato, AVRDC, Taiwan,* 1979.

Ulrich, A. Plant Analysis in sugar Beet Nutrition. *Plant Physiologist, Departament of soils and Plant Nutrition, University of California,* 1961.

- Uzo, I.O. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on the yield of tomato in humid tropics. Hort. Res. 11. 1970.
- Van Eysings, R. Fertilization of tomato with nitrogen. Center for Agric. Publish and Documen. Wagenigen. Center for. 1971.
- Vázquez, G. et J.A. González. Determinación de la dosis óptima de fertilización en el cultivo del tomate en México. Campo Experimental de el Bajío. CIAB. Informe anual. 1980.
- Vermeiren, L. Riego Localizado. Estudio F.A.O. Riego et Drenaje. (36). Roma, Italia, 1986;
- Villareal, R.L. Tomato Production in the Topics. Problems and Progress. Proc. of the I International Symposium on Tropical. AVRDC. october 23-27, 1978
- Villegas, R. ; Urbicia Gómez, Maria Adriana Mato et M. Lopez. El fosforo en la agricultura de Cuba. 1<sup>ère</sup> Reunion Nac. de Agroquimica. Ponencia. Direccion Agricola. Academia de Ciencias de Cuba. 1983.
- Wallace. T. Las deficiencias minerales de las plantas. Su dignostico a través de los sintomas visibles. T. Wallace. Barcelona. Espana : Editorial Ariel. 1980.
- Warren. Cr.. Hydraulics., Mechanics and Economics of subsurface and drip irrigation of Hawiian sugar cane. WV Cong. of Intern. Soc of Sugar Cane Technologists Hurbaw South Africa. 2. 1974.
- Weathers, L. G. S. Pound. Host nutrition in relation to multiplication of tomato masaic virus in tomato. Phytopathology. 44. 1954.
- Widders, I.E. et O.A. Lorenz. Nutricion del tomate durante su desarrollo. Journ Amer. Soc. Hort. Sci. 107 (6). 1982.
- Willis, L.E. ; F.S. Davies and D.A. Graetz. Fertilization and growth of young "Hamlin" orange trees in Florida. HortScience 26 (2) : 106-109. 1991.
- Wolf, J.M. and L. Dorosdoff. Soil water studies and oxisoil and Univer. Puerto-Rico 60. 1976.