



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 10806

To link to this article : DOI:10.4141/P02-080

URL : <http://dx.doi.org/10.4141/P02-080>

To cite this version : Morard, Philippe and Caumes, Edith and Silvestre, Jérôme *Influence de la concentration de la solution nutritive sur la croissance et la nutrition minérale de la tomate.* (2004) Canadian journal of soil science, vol. 84 (n° 1). pp. 299-304. ISSN 1918-1841

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Influence de la concentration de la solution nutritive sur la croissance et la nutrition minérale de la tomate

Philippe Morard, Edith Caumes, et Jérôme Silvestre

Laboratoire d'Agronomie Environnement Ecotoxicologie, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse, BP 107, 31325 Castanet Tolosan, France (morard@ensat.fr, caumes@ensat.fr, silvestre@ensat.fr).
Reçu le 14 juin 2002, accepté le 17 septembre 2003.

Morard, P., Caumes, E. et Silvestre, J. 2004. **Influence de la concentration de la solution nutritive sur la croissance et la nutrition minérale de la tomate.** Can. J. Plant Sci. **84**: 299–304. L'influence de deux concentrations de solution nutritive a été étudiée sur la croissance et la nutrition minérale de la tomate en culture hydroponique sous serre au stade début floraison. La force ionique de la solution nutritive la plus concentrée était de 20.00 meq L⁻¹ (SNC), valeur proche de celle qui est habituellement utilisée pour la culture de la tomate ; celle de la solution diluée (SND) était de 3.25 meq L⁻¹. Pendant les deux semaines de l'expérimentation, la concentration du milieu nutritif n'a pas eu d'effet sur la croissance et le développement des tomates. La solution nutritive concentrée a induit une consommation de luxe en macroéléments (calcium, magnésium, soufre et phosphore) et un antagonisme entre les ions divalents (Ca-Mg) et le potassium. La solution nutritive diluée a limité la précipitation de sels dans le milieu, à la surface et dans les racines ; elle a amélioré l'efficacité de l'eau consommée et la nutrition en microéléments des feuilles (Fe, Mn, Cu, Zn). Pour la culture hors sol de la tomate, il semble donc préférable d'utiliser des solutions nutritives plus diluées que celles qui sont habituellement utilisées. Cette pratique permettrait de diminuer les quantités d'éléments minéraux utilisées et surtout limiterait l'impact des effluents de solutions nutritives non recyclées sur l'environnement. Par contre, pour éviter tout risque de facteur limitant nutritionnel, il serait indispensable de contrôler régulièrement le niveau des concentrations en éléments minéraux dans la solution nutritive.

Mots clés: *Lycopersicon esculentum*, culture hors sol, solution nutritive, concentration, nutrition minérale

Morard, P., Caumes, E. and Silvestre, J. 2004. **Influence of nutritive solution concentration on the growth and mineral nutrition of tomatoes.** Can. J. Plant Sci. **84**: 299–304. The influence of two nutrient solution concentrations on growth and mineral nutrition of hydroponic tomato culture (flowering stage) was studied in the greenhouse. The ionic strengths of the nutrient concentration were 20.00 meq L⁻¹ for the most concentrated nutrient solution usually used for tomato culture (SNC) and 3.25 meq L⁻¹ for the most diluted solution (SND). During the 2 wk of the experiment, the concentration of the nutrient solution had no effect on growth and development of tomato plants. The SNC nutrient solution induced a luxury consumption for macronutrients (Ca, Mg, P, S) and an antagonism between Ca-Mg and K. The SND nutrient solution limited salt precipitation in the nutrient medium and on/in the roots; the diluted solution improved micronutrient nutrition of leaves (Fe, Mn, Cu, Zn) and water use efficiency. For tomato soilless culture, diluted solutions are better than normally used. But in this case, the macronutrient concentration level must be regularly controlled to avoid that becomes limiting.

Key words: *Lycopersicon esculentum*, soilless culture, nutrient solution, concentration, mineral nutrition

La croissance et le développement des végétaux en culture hors sol nécessitent en permanence une bonne synchronisation entre les besoins des végétaux en éléments minéraux et leur fourniture par la solution nutritive. Dans ce système de culture, la composition de cette solution nutritive est une composante fondamentale du rendement et de la qualité des productions puisqu'elle constitue le seul vecteur de l'alimentation hydrominérale des plantes. Or, la formulation des solutions nutritives reste encore largement empirique. Il en résulte un grand nombre de formules, vraisemblablement plus d'une centaine. Certaines sont adaptées à une espèce végétale, d'autres sont plus polyvalentes (Morard 1995). La composition minérale de la solution peut aussi être ajustée en fonction de la technologie de culture utilisée (recyclage, substrat...), du stade de développement et des conditions climatiques (influence sur la photosynthèse et la transpiration). La concentration totale en macroéléments dans les solutions nutritives est en général relativement élevée, d'une part pour éviter l'apparition de tout facteur nutritionnel limitant, d'autre part, pour limiter leur

renouvellement. Elle se situe en moyenne autour de 20 meq L⁻¹ de cations et de 20 meq L⁻¹ d'anions (soit environ 2 g L⁻¹ de sels). Or, cette pratique, aussi bien en recherche qu'en production horticole, présente deux inconvénients : (i) les concentrations élevées favorisent une consommation de luxe en macroéléments et peuvent parfois induire des phénomènes d'antagonismes entre les ions de même charge, (ii) le développement en horticulture des techniques hydroponiques à solution nutritive non recyclée engendre des effluents qui représentent un risque important de pollution de l'environnement. En effet, 30 à 40% des solutions nutritives ne sont pas utilisées par la culture et sont rejetées dans les sols et les eaux de surface. Ainsi, les effluents, mesurés pendant la période de production d'une culture de tomate sur substrats de laine de roche, ont été évalués, par hectare et par an, à 3 450 m³ de solution de drainage contenant 5 588 kg de sels minéraux dont 2 355 kg de nitrates (Morard et Martinez 2001). Pour réduire l'impact de ces éléments sur l'eutrophisation des eaux de surfaces, il serait souhaitable de réduire la concentration des solu-

Tableau 1. Composition en macroéléments (meq L⁻¹) des solutions nutritives concentrées (SMD) et diluées (SMC)

Traitements	ANIONS				CATIONS			
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	Somme	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Somme
SNC	15.00	2.00	3.00	20.00	7.00	10.00	3.00	20.00
SND	2.75	0.35	0.15	3.25	2.60	0.50	0.15	3.25
% de dilution SND/SNC	18.3	17.5	5	16.25	37.10	5	5	16.25

tions nutritives en sels minéraux. Pour la plupart des espèces cultivées, une telle dilution, proche des teneurs de la solution du sol, est sans conséquence sur la croissance des végétaux. Par contre, pour la tomate, il semble qu'une réduction de concentration de plus de 50% en macroéléments entraîne des effets négatifs sur le rendement (Brun et Montarone 1987 ; Siddiqi et al. 1998).

L'objectif de ce travail est d'étudier les effets d'une réduction de la concentration de la solution nutritive sur la croissance, la consommation hydrique et minérale de la tomate en aquiculture. Le protocole expérimental est basé sur la comparaison entre une solution dite "concentrée" (SNC), proche des solutions habituellement utilisées, composée de 20 meq L⁻¹ d'anions et de cations et une solution dite "diluée" (SND) ne contenant que 3.25 meq L⁻¹ d'anions et de cations. La spécificité de l'approche expérimentale réside dans la différence des facteurs de dilution utilisés pour les macroéléments : les éléments dont la plante a un besoin en quantité limitée (Ca, Mg, S) sont dilués au 1/20^e, ceux pour lesquels les besoins sont importants (N, P, K) sont moins dilués (respectivement ≈1/6^e, 1/6^e et 1/3^e).

MATERIELS ET METHODES

Les graines de tomates *Lycopersicon esculentum* (Mill.) 'Rondello' (De Ruiters) sont mises à germer à l'obscurité à une température de 22°C et à une humidité de 100% pendant 5 jours. Après une phase de verdissement de 48 heures à la lumière à 22°C, les plantules de tomate sont mises en culture en phytotron sur une solution nutritive complète (Morard 1995), non circulante et aérée, en conditions contrôlées (jour 14h/25°C ; nuit 10h/22°C ; humidité relative 55–60%). L'éclairage mesuré à la surface des bacs de culture est de 175 µE m² s⁻¹ : cette valeur, qui tient compte de l'ombre portée des parties aériennes, peut être considérée comme une intensité lumineuse moyenne pour cette espèce (Tremblay et al. 1984 ; Larouche et al. 1989).

Protocole expérimental

Quand les plantes ont atteint le stade 9 feuilles (stade début floraison), deux traitements nutritifs ont été appliqués. Ils se différenciaient par la formulation des solutions nutritives : l'une était concentrée (SNC) et contenait 20 meq L⁻¹ de cations et 20 meq L⁻¹ d'anions (Morard 1995), l'autre était diluée (SND) et sa formulation a été établie après un bilan de consommation réalisée à partir d'une culture hors sol de tomate en système recyclé. Cette expérimentation, conduite dans une station expérimentale du Sud-Ouest de la France pendant 130 jours au cours de la période de production, avait mis en évidence des différences entre les quantités apportées par la solution nutritive et la consommation des tomates : l'utilisation de N P K était

plus élevée que celle de Ca Mg S (Morard et Martinez 2001). Aussi, dans l'étude présentée ci-après, les concentrations en Ca-Mg-S correspondent à 5% de la SNC alors que pour les autres macroéléments elle représentait 37% pour K et 18% pour N et P (tableau 1). La composition en micro-éléments était identique pour les deux solutions, soit en mg L⁻¹: Fe 15, Mn 0.49, B 0.26, Zn 0.11, Cu 0.25, Mo 0.01.

L'expérimentation a été conduite en aquiculture (sans substrat, solution nutritive aérée non circulante). Avant le début de l'expérimentation, les plantes ont été acclimatées pendant une semaine sur le milieu nutritif SNC ou SND. Le plan expérimental comportait 2 traitements (SNC, SND) et 4 répétitions. Chaque répétition était constituée par une plante placée dans un bac individuel de 6 litres. L'expérimentation a duré 2 semaines. La solution nutritive a été renouvelée une fois à la fin de la première semaine pour la solution concentrée (SNC) et changée tous les 2 jours pour la solution nutritive diluée (SND).

Mesures effectuées

Deux types de mesures ont été effectués : les unes régulièrement chaque jour tout au long de l'expérimentation, les autres à la récolte. Les mesures régulières de concentration en macroéléments dans les solutions nutritives ont permis de calculer la consommation minérale journalière pour chaque plante. Les solutions nutritives étaient complétées avec de l'eau déminéralisée avant chaque prélèvement, la quantité d'eau rajoutée a permis de mesurer la consommation hydrique journalière de chaque plante. La biomasse de chaque plante a été également mesurée quotidiennement.

A la fin de l'expérimentation, les plantes ont été fractionnées en feuilles, tiges et racines puis séchées (48 h à 70°C) et broyées. L'analyse en éléments minéraux a été effectuée après calcination à 550°C et reprise des cendres à l'acide chlorhydrique 12 N.

Le dosage des éléments minéraux (K, Ca, Mg, P et S) a été effectué par chromatographie ionique (Dionex DX-100, ionpac CS-12A and AS4A-SC, Dionex Co., Sunnyvale, CA, USA). L'azote, le carbone et l'hydrogène ont été analysés directement sur les poudres végétales sèches à l'aide d'un analyseur automatique (Leco CHN 2000, St Joseph, MI, USA). L'observation en microscopie électronique à balayage a été réalisée après fixation au glutaraldéhyde.

Les données analytiques ont été traitées statistiquement par analyse de variance (Sigma Stat).

RESULTATS ET DISCUSSION

Croissance et développement

La concentration des solutions nutritives n'a pas d'influence sur la croissance et le développement des tomates. A la fin de

Tableau 2. Matières sèche des différents organes et plantes entières de tomate récoltées après 15 jours de culture sur solution nutritive concentrée (SNC) ou diluée (SND)

	Matière sèche (g plante ⁻¹)			
	Feuilles	Tiges	Racines	Plante entière
SNC	15.75 ± 0.70	3.75 ± 0.03	3.12 ± 0.21	22.62 ± 0.92
SND	16.72 ± 1.33	4.54 ± 0.38	3.86 ± 0.20	25.12 ± 1.91
Signif.	NS	NS	**	NS

Test de Tukey **, différence significative à $P < 5\%$; NS, différence non significative.

Tableau 3. Teneurs (% m.s) en éléments minéraux dans les différents organes de plant de tomate après 15 jours de culture en solution nutritive concentrée (SNC) ou diluée (SND)

	K			Ca			Mg		
	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines
SNC	4.83 ± 0.46	7.05 ± 0.59	4.94 ± 1.38	2.56 ± 0.17	1.67 ± 0.12	4.01 ± 0.04	0.51 ± 0.05	0.39 ± 0.01	0.38 ± 0.06
SND	5.59 ± 0.36	7.71 ± 0.15	5.44 ± 0.83	1.72 ± 0.13	1.06 ± 0.05	0.97 ± 0.24	0.29 ± 0.01	0.20 ± 0.00	0.19 ± 0.05
Signif.	*	*	*	**	**	**	NS	NS	NS

	N			P			S		
	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines
SNC	6.13 ± 0.08	4.67 ± 0.07	3.32 ± 0.10	0.61 ± 0.00	0.74 ± 0.07	2.42 ± 0.29	0.51 ± 0.06	0.24 ± 0.02	0.28 ± 0.02
SND	4.68 ± 0.16	4.04 ± 0.85	4.01 ± 0.46	0.63 ± 0.14	0.49 ± 0.13	0.64 ± 0.06	0.47 ± 0.08	0.13 ± 0.04	0.16 ± 0.05
Signif.	**	NS	NS	**	**	**	NS	**	**

Test Kruskal-Wallis **, différence significative à $P < 5\%$; *, différence significative à $P < 10\%$; NS, différence non significative.

Tableau 4. Consommation minérale totale mesurée par plant de tomate après 15 jours de culture en solution nutritive concentrée (SNC) ou diluée (SND)

(meq 100 g ⁻¹)	K	Ca	Mg	N	P	S
SNC	20.02 ± 4.68	20.56 ± 2.59	6.89 ± 0.18	33.86 ± 2.72	4.99 ± 0.17	6.60 ± 0.27
SND	14.39 ± 3.57	5.83 ± 2.26	1.68 ± 0.55	24.93 ± 5.10	2.65 ± 0.50	0.91 ± 0.26
Signif.	NS	**	**	NS	**	**

Test Tukey **, différence significative à $P < 5\%$; NS, différence non significative.

l'expérimentation toutes les plantes sont au même stade de développement (15 feuilles). Les poids secs total par plante à la récolte ne présentent pas de différences significatives (tableau 2). Seul le système racinaire des plantes cultivées sur solution diluée SND présente un poids sec significativement supérieur au seuil de 5% à celui observé avec une solution concentrée SNC (Gosselin et al. 1984). L'évolution de l'augmentation de la matière fraîche, suivie par des pesées journalières non destructives de chaque plante, ne montre pas de différences significatives (Caumes 2002). Ce résultat confirme que pour la culture hors sol de la tomate, il est possible d'abaisser la concentration globale de la solution nutritive de plus de 50% sans altérer le rendement en matière fraîche ou en matière sèche (Klaring et Schwartz 1999). Des expérimentations plus fines, réalisées par Siddiqi et al. (1998), situaient le seuil limite de diminution de la concentration entre 50% et 90% des solutions nutritives habituellement utilisées. Les résultats de la présente expérimentation montrent qu'il est possible de diminuer la concentration globale en macroéléments de 84% sans entraîner la réduction de la croissance et du développement de la tomate. Par contre, cette diminution de concentration doit être modulée en fonction des besoins de la plante, notamment pour N-P-K. Pour l'azote, il est admis que, pour éviter toute diminution de rendement, la concentration minimale en nitrates doit se situer

autour de 8 meq L⁻¹ (Gomez-Lepe et Ulrich 1974 ; Wilcox et al. 1985). Dans nos conditions expérimentales, il semble possible d'abaisser la concentration en nitrates à 3 meq L⁻¹ sans diminuer la croissance et le développement de la tomate.

Nutrition en macroéléments

Les teneurs en macroéléments ont été analysées dans les différents organes des plantes à la fin de l'expérimentation (tableau 3). Les teneurs en macroéléments sont presque toujours plus élevées dans les organes des tomates cultivées sur solution nutritive concentrée (SNC) par rapport à celles des plantes cultivées sur solution plus diluée (SND), à l'exception du potassium dans tous les organes et de l'azote dans les racines. Dans la plupart des cas, ces différences sont significatives au seuil de 5%. Ces résultats confirment que, dans la gamme de concentration étudiée, l'absorption des éléments minéraux par la tomate est directement liée à la concentration de ces ions dans le milieu nutritif (Pardossi et al. 1987). Comme cette augmentation des teneurs dans le traitement SNC ne se traduit pas par une augmentation significative de la matière sèche, cette expérimentation met en évidence une consommation de luxe à partir de la solution concentrée pour le calcium, le magnésium, le phosphore

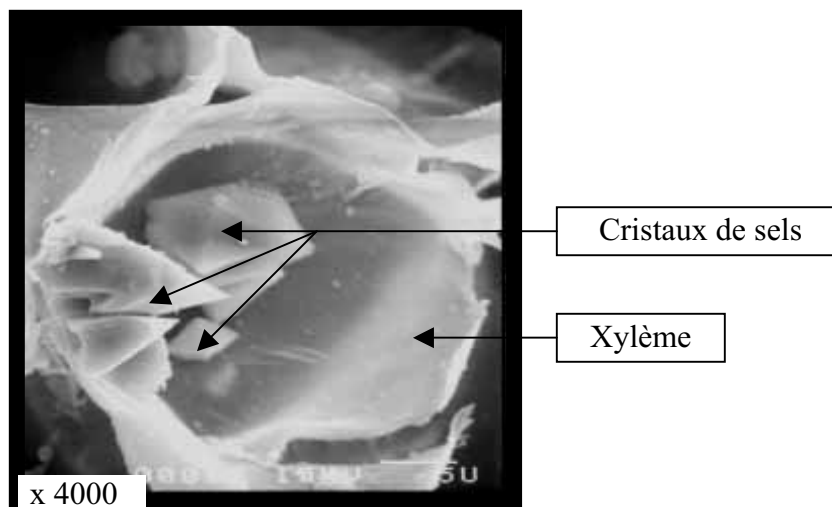


Fig. 1. Photographie en microscopie électronique à balayage d'une section de racine de tomate cultivée 15 jours en solution nutritive concentrée (SMC).

(excepté dans les feuilles), le soufre et l'azote dans les parties aériennes.

Cependant, une étude plus fine des résultats (tableau 3) révèle trois anomalies :

- les teneurs en calcium et en phosphore des racines des plantes cultivées sur solution concentrée (SNC) sont près de 4 fois supérieures à celles des plantes cultivées sur solution diluée (SND),
- les teneurs en potassium des différents organes des plantes issues de milieux concentrés (SNC) sont inférieures à celles des organes homologues des plantes issues de milieux dilués (SND),
- la teneur en azote total des racines SNC est inférieure à celle des racines SND.

Ces différents points seront abordés successivement et des explications seront présentées à partir d'autres données analytiques recueillies lors de cette expérimentation.

Précipitation de sels minéraux

La méthode expérimentale choisie (aquiculture) permet d'effectuer un bilan précis de la consommation des éléments minéraux par plante en mesurant l'évolution de la concentration dans le bac de culture à chaque changement de solution nutritive. L'addition des quantités d'ions qui ont disparu de la solution nutritive au cours de l'expérimentation permet d'évaluer la consommation totale de chaque macroélément par plante (tableau 4). La comparaison de ces résultats avec les teneurs de ces éléments dans les différents organes des tomates (tableau 3) montre que pour Ca, Mg, S et en partie P, l'augmentation des teneurs dans les différents organes pour SNC est très inférieure à la disparition de ces mêmes espèces ioniques dans la solution nutritive. L'explication réside dans la précipitation de ces ions sous forme de cristaux de sels insolubles qui apparaissent non seulement dans le bac de culture mais aussi à la surface et même dans les racines (Vallès et al. 1990). En effet, grâce à

l'utilisation d'un modèle thermodynamique de prévision des risques de précipitation dans les solutions solides utilisé en géochimie (Végéact), nous avons montré que le seuil de précipitation de certains éléments était atteint dans les solutions nutritives concentrées (type SNC). Les constantes de dissociation des différentes combinaisons possibles des ions Ca^{++} , Mg^{++} , H_2PO_4^- et SO_4^- laissent prévoir leur précipitation vraisemblablement sous forme d'apatites, de phosphate de magnésium et de sulfate de calcium (Morard et al. 1987). Effectivement en fin de culture, on observe au fond des bacs des traitements SNC un léger dépôt qui a été isolé et analysé : sa composition minérale révèle la présence de calcium, de phosphore et de fer. D'autre part, l'observation en microscopie électronique à balayage de section de fragments de racines du traitement SNC a révélé la présence de cristaux à l'intérieur des vaisseaux de xylème (figure 1). Une analyse complémentaire de ces cristaux par EDAX (Energy Dispersive Analysis X-Ray) a montré que ces cristaux contenaient du calcium, du phosphore et du fer.

Ainsi, l'ensemble de ces observations montre que les solutions nutritives les plus concentrées (20 meq L^{-1} de cations et 20 meq L^{-1} d'anions) présentent donc un risque de précipitation plus élevé que les solutions plus diluées (SND). Il faut préciser que les éléments rétrogradés sous formes de cristaux insolubles dans la solution nutritive ne sont plus disponibles pour les racines, donc pour l'alimentation minérale de la tomate.

Antagonisme du calcium et du magnésium vis-à-vis du potassium

Les teneurs en potassium sont significativement inférieures dans tous les organes des plantes cultivées dans la solution nutritive concentrée SNC (tableau 3). Or, en général, une augmentation de la concentration en potassium dans le milieu nutritif se traduit par une élévation de la teneur en cet élément dans les végétaux (Marschner 1995). Ce résultat est

Tableau 5. Teneur en oligoéléments (ppm) dans les différents organes de plant de tomate après 15 jours de culture en solution nutritive concentrée (SNC) ou diluée (SND)

	Fe			Mn		
	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines
SNC	111.66 ± 1.77	76.51 ± 8.04	–	120.63 ± 6.75	56.11 ± 8.01	1109.32 ± 85.84
SND	204.69 ± 3.51	69.27 ± 10.31	–	431.89 ± 20.59	195.15 ± 3.21	1135.08 ± 16.47
Signif.	**	NS	NS	**	**	NS

	Cu			Zn		
	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines
SNC	28.35 ± 0.88	51.43 ± 6.88	67.26 ± 6.47	28.35 ± 0.88	51.43 ± 6.88	67.26 ± 6.47
SND	38.44 ± 2.69	67.26 ± 7.96	78.60 ± 4.16	38.44 ± 2.69	67.26 ± 7.96	78.60 ± 4.16
Signif.	**	NS	**	**	NS	NS

Test Kruskal-Wallis **, différence significative à $P < 5\%$; NS, différence non significative.

la conséquence d'un antagonisme entre les ions divalents (calcium, magnésium) et le potassium. Le comportement particulier du potassium dans cette expérimentation s'explique (i) par un rapport K/Ca + Mg plus élevé (4.0) dans le milieu dilué que dans le milieu concentré (0.55), (ii) par une plus forte concentration en calcium dans la solution nutritive SNC (10 meq L⁻¹) par rapport à la solution diluée SND (0.5 meq L⁻¹). La teneur très élevée en calcium dans les racines des plantes cultivées en solution concentrée (SNC : 4.01%) freine l'absorption et la translocation du potassium.

Ainsi, ce résultat montre que la charge ionique de la solution nutritive concentrée, et plus particulièrement la concentration en calcium, est trop élevée puisqu'elle induit un antagonisme Ca/K et qu'une solution plus diluée est mieux adaptée à la culture de la tomate.

Nutrition en microéléments, efficacité de l'eau consommée, composition de la matière organique

Les plantes cultivées sur solution diluée (SND) ont des teneurs significativement plus élevées dans les feuilles en fer, en manganèse, en cuivre et en zinc (tableau 5). Il faut rappeler que la concentration en oligoéléments était identique pour les deux traitements SNC et SND. La culture de tomate sur solution diluée en macroéléments permet d'améliorer la translocation des microéléments vers les feuilles.

La consommation en eau, mesurée pour chaque plante durant les 14 jours d'expérimentation indique qu'en moyenne les plantes cultivées sur milieu dilué ont consommé légèrement moins d'eau (SND = 5.5 L) que celles sur solution concentrée (SNC = 6.2 L). Cette valeur ramenée à la production de biomasse sèche permet de déterminer le coefficient de transpiration (quantité d'eau nécessaire à l'élaboration d'1g de matière sèche). Ce coefficient est inférieur pour les plantes cultivées sur solution diluée (tableau 6). Ainsi, l'utilisation de solutions nutritives diluées pour la culture hors sol de la tomate se traduit par une meilleure efficacité de l'eau consommée.

La matière organique des plantes récoltées a été analysée en carbone et hydrogène (tableau 7) et en azote (tableau 3). Les teneurs en carbone et le rapport C/N sont significativement plus élevés dans les organes des plantes cultivées sur milieux dilués (SND) par rapport aux valeurs obtenues à partir de milieux concentrés (SNC). Cette influence de la concentration du milieu nutritif sur la composi-

Tableau 6. Consommation et efficacité en eau de plants de tomate après 15 jours de culture en solution nutritive concentrée (SNC) ou diluée (SND)

	Consommation en eau (mL par plante)	Coefficient de transpiration (mL g ⁻¹ m.s.)
SNC	6165 ± 28	480 ± 7
SND	5495 ± 42	458 ± 6
Signif.	*	**

Test Tukey *, différence significative à $P < 10\%$; **, différence significative à $P < 5\%$; NS, différence non significative.

tion de la matière organique ne semble pas avoir été signalée dans la littérature. Les résultats de cette expérimentation montrent clairement que la solution nutritive diluée favoriserait l'élaboration de matière carbonée de type (CH₂O)_n au détriment de macromolécules organiques contenant de l'azote (protéines, acides nucléiques...). Ce résultat est à relier avec l'augmentation significative du poids des racines en solution diluée (tableau 2). La croissance du système racinaire (essentiellement constitué de matériau lignocellulosique) est plus importante dans les milieux faiblement concentrés en éléments minéraux indispensables (Callot et al. 1982).

CONCLUSION

L'expérimentation a permis de comparer la croissance et la nutrition de tomates cultivées sur des solutions nutritives qui se différencient par deux niveaux de concentration en macroéléments. Les résultats, obtenus pendant deux semaines de culture au stade floraison, ont montré que l'on peut abaisser de près de 84% la charge ionique du milieu nutritif sans diminuer la croissance et le développement des plantes. La solution nutritive concentrée a induit une consommation de luxe en macroéléments (calcium, magnésium, soufre et phosphore) et un antagonisme entre les ions divalents (Ca-Mg) et le potassium. La solution nutritive diluée a limité la précipitation de sels dans le milieu nutritif, à la surface et dans les racines ; elle a amélioré l'efficacité de l'eau consommée et la nutrition en microéléments des feuilles (Fe, Mn, Cu, Zn) ; elle semble aussi avoir une influence sur la composition de la matière organique.

Certes, ces conclusions devraient être validées sur une période de culture plus longue et surtout pendant la phase de

Tableau 7. Composition en carbone (C), azote (N) et hydrogène (H) des différents organes de plants de tomate après 15 jours de culture en solution nutritive concentrée (SNC) ou diluée (SND)

	% C			RAPPORT C/N			% H		
	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines	Feuilles	Tiges	Racines
SNC	41.22 ± 0.16	37.41 ± 0.54	38.85 ± 1.26	6.73 ± 0.06	8.02 ± 0.33	11.71 ± 0.82	4.62 ± 0.04	4.09 ± 0.04	4.35 ± 0.16
SND	43.51 ± 0.57	43.10 ± 0.44	48.73 ± 2.43	9.29 ± 0.28	10.66 ± 0.29	12.16 ± 0.39	4.72 ± 0.04	4.50 ± 0.06	5.29 ± 0.34
Signif.	**	**	**	**	**	**	**	**	**

Mann-Whitney Rank sum test **, différence significative à $P < 5\%$.

production de cette culture. Cependant, ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour la conduite de la culture hors sol de la tomate. En effet, le recours en horticulture à des solutions nutritives moins concentrées que celles habituellement utilisées permettrait de réduire la quantité d'éléments minéraux à fournir à la culture et surtout limiterait l'impact sur l'environnement des effluents de solutions nutritives non recyclées. De plus, pour les systèmes recyclés, l'utilisation de solutions nutritives faiblement concentrées permet un rééquilibrage plus facile. Ce système de culture nécessite néanmoins des contrôles fréquents et réguliers (une à deux fois par semaine) afin de corriger le plus rapidement possible la composition de la solution circulante et éviter ainsi tout facteur nutritionnel limitant.

Brun, R. et Montarone, M. 1987. Influence de la concentration saline de la solution nutritive sur la réaction de la plante. Pages 171–202 dans *Les cultures hors sol*. INRA, Paris, France.

Callot, G., Chamayou, H., Maertens, C. et Salsac, L. 1982. Croissance et développement du système racinaire. Pages 209–220 dans *Les interactions sol-racines*. INRA, Paris, France.

Caumes, E. 2002. Contribution à l'étude des mécanismes d'adaptation de la tomate à l'asphyxie racinaire. Thèse INP Toulouse, France, 130 pp.

Gomez-Lepe, B. E. et Ulrich, A. 1974. Influence of nitrate on tomato growth. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **99**: 45–49.

Gosselin, A. Chalifour, F. P., Trudel M. J. et Gendron G. 1984. Influence de la température du substrat et de la fertilisation azotée sur la croissance, le développement, la teneur en azote et l'activité de la nitrate réductase chez la tomate. *Can. J. Plant Sci.* **64**: 181–191.

Klaring, H. P. et Schwarz, D. 1999. Model-based control of concentration of nutrient solution in glasshouse tomato cultivation. *Acta Hortic.* **507**: 127–132.

Larouche, R., Gosselin, A. et Vézina, L. P. 1989. Nitrogen concentration and photosynthetic photon flux in greenhouse tomato production, growth and development. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **114**: 458–461.

Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2^{ième} ed. Academic Press, London, UK. 889 pp.

Morard, P. 1995. Les cultures végétales hors sol. Publications Agricoles, Agen, France. 303 pp.

Morard, P. et Martinez, S. 2001. Un progrès pour le recyclage en culture hors sol. *Fruits et Légumes* **197**: 36–39.

Morard, P., Vallès, V. et Anglard, M. P. 1987. Assessment of availability of ions to plant roots from the determination of their chemical activity in nutrient solutions. *J. Plant Nutr.* **10**: 539–551.

Pardossi, A., Tognoni, F. et Bertero, G. 1987. The influence of nutrient solution concentration on growth, mineral uptake and yield of tomato plants grown in NFT. *Adv. Hortic. Sci.* **2**: 55–60.

Tremblay, N., Trudel, M. J. et Gosselin, A. 1984. Influence of supplementary lighting on yield and mineral nutrition of tomato plants grown in hydroponic culture. Pages 697–703 dans *6^{ième} Intern. Congress Soilless Culture, ISOSC, Wageningen, The Netherlands*.

Siddiqi, M. Y., Kronzucker, H. J., Britto, D. T. et Glass, A. D. M. 1998. Growth of a tomato crop at reduced nutrient concentration as a strategy to limit eutrophication. *J. Plant Nutr.* **21**: 1879–1895.

Vallès, V., Bernadac, A., Bourrié, G., Morard, P. et Ponoziowski, A. 1990. Prédiction de la précipitation des phosphates dans des solutions nutritives contenant de l'EDTA par le modèle Végéact. *Agrokimia, URSS* **1**: 74–81. [en russe]

Wilcox, G. E., Magalhaes, J. R. et Silva F. L. 1985. Ammonium and nitrate concentrations as factors in tomato growth and nutrient uptake. *J. Plant Nutr.* **8**: 989–998.