

Fertigation de la Tomate Hors Sol dans la Zone de Douiet au Maroc

A. Aït Houssa⁽¹⁾, El. Nouga⁽²⁾, H. Oualili⁽²⁾, Y. Chtaïbet⁽²⁾, A. Chaddad⁽²⁾

(1) Département d'Agronomie. Ecole Nationale d'Agriculture, BP S/ 40, Meknès - Maroc.

(2) Département d'Horticulture, Domaine Agricole de Douiet Fès - Maroc

Résumé

Au terme de dix huit ans d'expérience, à quelques améliorations spécifiques près, la méthode Coïc-Lesaint faisant intervenir 4 solutions différentes en fonction des stades de la culture, s'est montrée tout à fait adaptée à la fertigation de la tomate en hors sol dans le contexte de Douiet au Maroc.

Pour un rendement de l'ordre de 220-250 t/ha, la consommation en fertilisants (drainage inclus) est de 800-1000 U/ha de N, 350- 400 U/ha de P₂O₅, 1700-2000 U/ha de K₂O, 280-350 U/ha de CaO, 120-160 U/ha de MgO, en plus des oligo-éléments.

Le prix de revient de la solution se situe entre 51.700 et 65.800 Dh/ha (5170 et 6580 \$/ha) selon les campagnes, et représente 8 à 10 % du coût de production total de la tomate.

Cette étude a été également une occasion pour discuter de l'impact de ce mode de fertigation avec solution perdue, sur l'environnement et sur la durabilité du système de production.

Mots clés additionnels : fertigation, tomate, hors sol.

1. Introduction

La culture en hors sol, est l'une des technologies modernes utilisées aujourd'hui en horticulture, pour valoriser les terrains à problèmes, où d'importantes productivités sont impossibles autrement qu'avec un substrat de culture artificiel.

C'est l'unique solution lorsque le sol naturel souffre de contraintes incorrigibles (terrain rocaillieux, hydromorphes, salés, ...), alors que tous les autres facteurs (climat, disponibilité et qualité de l'eau, proximité et prix du marché, ...) sont favorables.

C'est aussi la solution efficace pour d'anciens périmètres de monoculture surexploités dont les installations sont encore en bon état, pour continuer à produire, tandis que le sol est dans un état de fatigue (nématodes, fusariose vasculaire,...), où la restauration de sa productivité n'est plus possible, grâce aux interventions agronomiques courantes telle la désinfection [Couteaudier et al, 1985 ; Aït Houssa, 1998].

Dans de nombreux cas, la reconversion plein sol/hors sol peut également s'avérer intéressante, si par rapport à la culture en plein sol, les éléments disponibles montrent que des gains substantiels de productivité et surtout de rentabilité en sont attendus.

D'une manière générale, pour tirer un meilleur parti de cette technologie, les principaux facteurs forces mis en jeu sont le substrat, le potentiel variétal, la conduite sous abri (chauffé ou non) et la fertigation.

Le but de cet article est de faire le point sur la fertigation au Domaine Agricole de Douiet, après 18 ans d'expérience sur le sujet.

2. Contexte général de production

Le projet de tomate hors sol, objet de la présente communication, a été réalisé en 1987/88 dans la zone de Douiet, sis à environ 10 km à l'Ouest de la ville de Fès, sur la route de Sidi Kacem. Il compte une superficie d'environ 20 ha de tomate indéterminée (Prisca au départ, Daniela par la suite; $d = 18.500$ plants/ha ; cycle total de 9 mois ; 22 à 24 bouquets/cycle) cultivée en conteneurs, sur pouzzolane locale extraite des carrières de Timahdite. Les premiers semis ont généralement lieu fin juillet/début août en vue d'une production pour l'exportation à partir de fin automne.

Le Climat de la zone est de type continental, caractérisé par un hiver froid et pluvieux ($T_{min} < 0^{\circ}C$; $P > 500$ mm/an) et un été sec et très chaud ($P \approx 0$ mm ; $T_{max.} > 40^{\circ}C$).

Du fait du froid hivernal, la tomate de primeur dans cette zone est produite sous abris plastiques (en partie de type Delta-9 et en partie multichapelles) chauffés en utilisant l'eau du forage géothermique de Aïn Allah (débit $q = 320$ l/s ; $T^{\circ} = 45^{\circ}C$; pression $P = 28$ bars). Compte tenu des minima à respecter en hiver pour éviter les dégâts sur la tomate [Gorini, 1997; Cornillon, 1985], l'étude géothermique a été réalisée avec comme objectif, lors des calculs du nombre de boucles de chauffage/unité de serre, d'avoir un ΔT de $+ 10^{\circ}C$, c'est à dire $+ 6^{\circ}C$ à l'intérieur de la serre, lorsque le thermomètre enregistre $- 4^{\circ}C$ à l'extérieur.

3. Conduite de la fertigation

3.1. Equilibres de base

Faute d'expérience au départ, la fertigation de la tomate a été conduite en reproduisant la méthode Coïc-Lesaint exactement comme elle a été décrite dans la littérature dans le contexte européen pour les plantes neutrophiles [Coïc et Lesaint, 1973 ; Verdure, 1985 ; Jeannequin, 1985 ; Ctifl, 1986]. Ce n'est qu'après un recul de 4 ou 5 ans, qu'il a été possible de commencer à lui apporter des modifications sensibles, afin de l'adapter aux conditions spécifiques de Douiet.

A moins que de nouveaux éléments interviennent dans l'avenir, pour encore faire évoluer les références constituées, les équilibres de travail qui se sont avérés les meilleurs dans cette zone, après 18 ans d'exercice, sont ceux rapportés dans le tableau 1.

Hormis les 3 semaines du semis/plantation (où le plant vit sur les réserves de la tourbe), la concentration azotée finale retenue à Douiet, pour une tomate destinée à l'export, est de 12.15 meq/L de l'élevage à la floraison du 2^{ème} bouquet (E1-f2), 13.43 meq/L de la floraison du 2^{ème} bouquet à la floraison du 6^{ème} bouquet (F2-F6), 12.51 meq/L de la floraison du 6^{ème} bouquet à la récolte du 2^{ème} bouquet et enfin 12.98 meq/L de ce dernier stade à la récolte du dernier bouquet.

La part de l'ammonium dans le but de stabiliser le pH tourne autour de 9 à 11 % selon les stades.

Tab.1 : Solutions type Coïc-Lesaint adaptées à la tomate indéterminée dans le contexte de Douiet (Maroc).

| | Azote (meq/L) | NH₄/N (%) | K/(Ca+Mg) | K/N | H₂PO₄⁻ (meq) | SO₄⁻ (meq) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|------------|--|---|
| E1 -F2 | 12.15 | 9 | 0.42 | 0.41 | 1.38 | 4.41 |
| F2-F6 | 13.43 | 10 | 0.59 | 0.48 | 1.58 | 4.06 |
| F6-R2 | 12.51 | 11 | 0.70 | 0.56 | 1.62 | 4.10 |
| R2-Fin. | 12.98 | 10 | 0.86 | 0.62 | 1.90 | 3.85 |

L'équilibre K/(Ca+Mg) est également fonction du stade végétatif. Plus faible au départ, il est ensuite revu à la hausse à chaque stade de référence pour atteindre une valeur de 0.86 à la récolte du deuxième bouquet où il sera ensuite maintenu constant jusqu'à la fin du cycle.

A Douiet, quoi qu'aucune carence en Phosphore n'ait jamais été notée sur la culture, la concentration en P adoptée est sensiblement plus confortable que la teneur recommandée par la version d'origine Coïc-Lesaint, soit 1.1 meq de H₂PO₄⁻ ou 2.2 meq de HPO₄⁻ [Verdure, 1985 ; Ctifl, 1986]. Enfin pour les sulfates, les concentrations adoptées sont plutôt voisines de celles proposées par la variante rapportée par Jeannequin [1985], qui tolère jusqu'à 6 meq/L contre 1.5 meq/L rapporté par Verdure.

En ce qui concerne les oligo-éléments, les concentrations adoptées ont été également portées au double des doses conventionnelles, ce qui donne 1.2 mg/L pour Fe, 1mg/L pour Mn et pour Zn, 0.50 mg/L pour B, 0.12 pour Cu et 0.05 pour Mo.

3.2. Méthode de calcul des solutions

Comme dans tout système de ce genre, la solution nutritive est calculée en tenant compte de l'eau d'arrosage utilisée (Tab.2). Avec une conductivité électrique de 0.65 mmhos/cm, dans le contexte marocain, l'eau de Douiet est d'une très bonne qualité chimique.

On sait qu'une solution nutritive peut être obtenue par le jeu de différentes combinaisons d'acides et d'engrais. Dans le cas particulier exposé ci-dessous, pour ramener le pH de 7.4 à 5.8 (valeur de référence pour les plantes neutrophiles comme la tomate), en neutralisant les bicarbonates (soit 4.70 meq/L), il faut un mélange de 2.17 meq/L d'acide sulfurique (d =1.83), 1.05 meq d'acide nitrique (d =1.41), et 0.69 meq d'acide phosphorique (d = 1.70).

La case n°7 du tableau donne la quantité de nitrate de calcium Ca(NO₃)₂, de nitrate de potasse KNO₃ et d'ammonitrate, nécessaire pour apporter les 12.04 meq/L de nitrates, compte tenu de l'équilibre NH₄/NO₃ et K/(Ca+Mg).

L'ammonium étant apporté en partie par le phosphate mono ammonique MAP (qui apporte en même temps le complément de P) et en partie par l'ammonitrate NH₄NO₃, et le complément de magnésium en utilisant du sulfate de magnésium MgSO₄.

Tab. 2 : Exemple de tableau de détermination des solutions nutritives type Coïc-Lesaint (phase F2-F6).

| | Solution fille (meq/L) | | | | | | | | |
|--|------------------------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| | K ⁺ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | NH ₄ ⁺ | H ₃ O ⁺ | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | HPO ₄ ⁻ | SO ₄ ⁻ |
| Eau | 0.02 | 2.99 | 2.44 | --- | --- | -- | -- | -- | 0.33 |
| HNO₃⁻ | | | | | 1.05 | 1.05 | | | |
| H₂SO₄ | | | | | 2.17 | | | | 2.17 |
| H₃PO₄ | | | | | 0.69 | | 0.69 | | |
| NH₄H₂PO₄ | | | | 0.89 | | | 0.89 | | |
| Nit. de Ca | | 4.02 | | | | 4.02 | | | |
| KNO₃ | 6.5 | | | | | 6.5 | | | |
| MgSO₄ | | | 1.56 | | | | | | 1.56 |
| NH₄NO₃ | | | | 0.49 | | 0.49 | | | |
| Σ ions | 6.52 | 7.0 | 4.0 | 1.38 | 3.91 | 12.06 | 1.58 | | 4.06 |

3.3. Acides et engrais utilisés

Au Maroc, il y a tout ce qu'il faut sur le marché comme acides et engrais pour préparer n'importe quel type de solution (acide nitrique, acide phosphorique, acide sulfurique, MAP, DAP, ammonitrate, sulfate d'ammoniaque, sulfate de magnésie, nitrate de magnésie, sulfate de zinc, sulfate de manganèse, sulfate de cuivre, fer sous forme EDTA, DTPA, H-EDTA, EDDHA,...). Par conséquent en 18 ans d'exercice de fertigation, Douiet a eu tout son temps pour tester toutes sortes de produits et de préparations (solution à base d'un seul acide et de mélange de plusieurs engrais, mélange d'acides + mélange d'engrais, engrais d'importation solides prêts pour l'emploi,...).

Avec l'apparition sur le marché, du sulfate de potasse dit Qualité A (propre et très soluble), durant les années 1993 à 1995 en particulier, l'effort a porté surtout sur la réduction du taux de KNO₃ au profit du sulfate, en montant parfois jusqu'à 6 meq/L de SO₄⁻ total dans la solution [Ouknider et Aït Houssa, 1994]. Il faudrait aussi citer l'importation directe en 1992, d'engrais pulvérulent prêt pour l'emploi sur tomate. Mais le résultat a été plutôt décevant, malgré le strict respect des prescriptions préconisées par le fabricant. D'une part, la solution donnait du feuillage de couleur pâle témoignant d'une insuffisance azotée, d'autre part, pour obtenir une EC correcte au départ, il a fallu multiplier la concentration par un facteur de 3 et par conséquent le prix de revient de la solution. Si bien qu'on a été obligé d'en interrompre le programme et de revenir aux produits simples, avant même d'avoir consommé le premier lot importé.

Finalement, le seul cocktail offrant le double avantage à la fois du prix et de la facilité d'emploi, est celui préparé à partir de mélanges d'acides à dominante acide sulfurique (tab.2) et de mélanges d'engrais divers à dominante nitrate de calcium et nitrate de potasse. L'ammonitrate, le MAP, le sulfate de magnésie,... ne sont en général utilisés que comme appoints dans un souci de respect de l'équilibre choisi.

D'une manière générale, les oligo-éléments sont apportés sous forme de sulfates pour le manganèse, le zinc, le cuivre, de Fe-DTPA ou H-EDTA pour le fer (EDDHA durant les premières années), de pentaborate de soude pour le Bore et de molybdate pour le molybdène.

3.4. Préparation des solutions-mères

C'est le niveau de concentration adopté (lui-même fonction du taux d'injection) et l'autonomie recherchée, qui fixent la quantité de solution-mère à préparer et par conséquent, le volume des cuves de mélange correspondant.

A Douiet, le taux d'injection pour la tomate est maintenu constant et égal à 5 % durant tout le cycle de la culture (3 % pour le pêcher, melon et autres légumes). L'ajustement des besoins en fonction des stades est obtenu en augmentant la fréquence d'injection des solutions et non par une modification de la concentration de celles-ci dans l'eau d'arrosage.

Le renouvellement de la solution a en général lieu tous les 10/12 jours, selon le nombre d'ha dominés par chaque station. L'expérience a montré qu'un plus long séjour se traduit par une perte de solubilité des produits (dépôt de fond de cuve) en fin d'utilisation, en particulier par temps froids.

Les stations de fertigation sont constituées de batteries de bacs noirs en PVC de 2 x 5000L, dont l'un est affecté à la solution A et l'autre à la solution B, en plus d'une cuve d'acide pour la rectification continue du pH. L'injection est assurée par des pompes doseuses de type double corps au début, hydraulique mono-corps par la suite.

Le tableau 3 ci-dessous, donne les quantités d'acides et d'engrais nécessaires pour préparer une tonne de solution-mère pour la phase de culture F2-F6, en tenant compte du poids de l'équivalent de chaque produit et du taux d'injection.

Tab.3 : Besoins en acides et en engrais pour préparer la solution-mère (stades F2-F6).

| Produit | Poids de l'eq (gr) | (kg/1000L) | Bac A (5000L) | Bac B (5000L) |
|-----------------------------------|--------------------|------------|---------------|---------------|
| Acide nitrique d = 1,41 | 91.10 | 19.12 | 95.64 | 0.480 |
| Acide sulfurique d = 1,83 | 25.62 | 11.12 | 55.60 | -- |
| Acide phosphorique d =1,70 | 115.6 | 15.95 | 79.76 | -- |
| MAP | 115 | 20.5 | 102.5 | -- |
| Nitrate de calcium 15.5 % | 98 | 78.8 | -- | 394.0 |
| Nitrate de potasse | 101 | 131.30 | 328.25 | 328.25 |
| Sulfate de magnésie 16 % | 123 | 38.40 | 192.0 | -- |
| Ammonitrate 33.5 | 80 | 7.85 | 39.20 | -- |
| Oligo-éléments | | besoins | Mn, Zn, | Fe chélaté |

Les précautions d'usage, pour obtenir une solution efficace et garantir en même temps la sécurité aussi bien des personnes que des installations, sont les mêmes que celles utilisées en hors sol partout ailleurs [Verdure, 1985; Citfl, 1986]:

- Calcul juste des concentrations à partir des produits choisis ;
- Respect impératif du coefficient de conversion de la solution fille en solution mère (ici K = 200 fois) ;
- Utilisation de deux bacs séparés afin d'éviter les précipités et les pertes de solubilité par contact en milieu concentré, entre le calcium d'une part, les sulfates et les phosphates d'autre part ;
- Répartition du KNO₃ moitié/moitié entre les deux bacs A et B ;
- Affectation du fer chélaté à la cuve B pour éviter sa précipitation ;
- Toujours verser l'eau la première puis l'acide ensuite, conformément au dicton de la chimie élémentaire (A dans E mais jamais E dans A) ;
- S'assurer du réglage des injecteurs et en vérifier régulièrement le fonctionnement.

3.5. Modalités d'injection

Sur le plan nutritionnel, une tomate hors sol est totalement dépendante de l'apport de la solution nutritive pour assurer sa croissance. Le délai de réponse de la culture est d'ailleurs très court et ne dépasse pas quelques jours en cas de solution pauvre ou déséquilibrée, en particulier sur substrat peu tamponné [Aït Houssa, 1998]

C'est le besoin en eau de la journée (lui-même fonction du stade végétatif et de l'ETP de la saison), qui détermine le volume et le nombre d'apports de solutions à réaliser.

Comme dans une culture conventionnelle, en hors sol, les périodes de plus faible consommation de solutions nutritives correspondent tout naturellement au début du cycle (septembre à novembre) où le plant est encore jeune, et aux périodes froides et de forte hygrométrie (300 à 500 CC/plant/j), alors que les moments de forte consommation correspondent aux périodes de pleine croissance par temps chaud, qui s'étalent de mars à juin (1 à 1.5L/plant/j).

L'injection est étalée sur toute la journée et s'arrête généralement la nuit. Le déclenchement du premier apport a lieu en début de matinée. Il est ensuite suivi d'un second en fin de matinée, d'un 3^{ème}, 4^{ème}, 5^{ème}, 6^{ème}, voire 7^{ème} l'après midi. Par contre, les périodes d'injection à éviter sont surtout le milieu de la journée par temps chaud où les stomates sont fermés, ce qui réduit la consommation en fertilisants et favorise les pertes inutiles de minéraux dans le drainage.

L'injection ne commence qu'une fois la pression stabilisée à un bar en tête du goutteur (obtenue après 2 à 3 min). Elle dure 7 minutes et peut être prolongée parfois en été avec de l'eau acidulée pour prévenir les risques de bouchage chimique [Bucks et Nakayama, 1980 ; Chossat, 1995].

Puisqu'on est en présence d'un système de fertigation avec solution perdue, c'est le contrôle du drainage dans les lysimètres, aménagés dans les serres à raison de 2 micro-puits par ha, qui guide l'injection.

3.6. Contrôles des solutions et du drainage

A Douiet, le vibreur, la loupe, le pH mètre et le conductimètre portables font partie de la trousse obligatoire du technicien affecté à l'hors sol. Le contrôle du pH et de l'EC est de type préventif, effectué selon le besoin, à la sortie des bacs, sous le goutteur et sur le drainage, même en l'absence de tout problème.

Dans la pratique, il est difficile de parler de pH ou de EC zéro variation avec le temps, par rapport aux valeurs prévues. Même en cas d'eau à composition en bicarbonates invariable dans le temps, d'injecteur bien réglé, de calcul parfait de quantité d'acide, on sait que le pH est sujet à des évolutions, ne serait-ce qu'à cause des échanges entre le système racinaire et la solution. L'acidification se produit en général à basse température quand la croissance est réduite, tandis que l'alcalinisation apparaît quand la croissance est vigoureuse, notamment en raison de l'enrichissement du milieu par des OH⁻ produits par une forte réduction du nitrate. D'autre part, des variations sensibles de pH peuvent également avoir en partie comme origine, des variations d'équilibres cations/anions [Cornillon, 1985].

Sauf erreur flagrante sur la quantité d'acide injecté (rare dans la pratique), à Douiet la tendance est le plus souvent à l'augmentation du pH, vraisemblablement en raison de la présence du CaCO₃ dans le substrat (tab.6).

D'une manière générale, le pH à la sortie du goutteur est considéré bon pour toute mesure qui se situe dans l'intervalle 5.8-6.2. L'intervention en vue d'une correction n'a lieu qu'au-delà de cette dernière valeur.

Du fait, encore une fois, qu'en est ici en présence d'un système avec solution perdue, pour éviter les effets pervers des à-coup de salinité, le type de gestion de la solution est celui du

‘filet de drainage permanent’ où il n’y a pas besoin d’attendre des valeurs d’EC exagérées dans le substrat, pour intervenir.

Tab.6 : Caractéristiques physico-chimiques de la pouzzolane de Timahdit.

| pH | Granulométrie mm | Calcaire ‰ | Ca.éch. meq/kg | CEC meq/kg | Capacité de rétention % | MO ‰ | EC mmhos/cm |
|-----|---------------------|---------------|-------------------|---------------|----------------------------|------|----------------|
| 8.3 | 3-14 | 9 | 304 | 420 | 10.4 | 9 | 0.10 |

D’une manière générale, la gamme d’EC de travail adoptée pour la tomate se situe entre 1.8 et 2.6 mmhos/cm. Des EC exceptionnelles plus fortes (> 3mmhos/cm), n’interviennent que lorsqu’on cherche à freiner un plant qui file trop par temps chaud ou à améliorer la fermeté des fruits afin qu’ils résistent mieux durant le transport. De même que la tomate n’est arrosée avec de l’eau acidulée seule que dans le cas particulier où les mesures dans le drainage, montrent une montée anormale de l’EC du substrat.

4. Consommations totales et prix de revient des solutions

Pour un rendement de l’ordre de 220-250 t/ha, la consommation en fertilisants et en acides, y compris les pertes par drainage, est de 800–1000 U/ha de N, 350- 400 U/ha de P₂O₅, 1700-2000 U/ha de K₂O, 280-350 U/ha de CaO, 120-160 U/ha de MgO, en plus des oligo-éléments.

De tels chiffres correspondent à env. 4 U/t pour l’azote, 1.5 U pour le phosphore, 8U pour la potasse, 1.5 pour le CaO et 0.6 pour le MgO.

En équivalent produits, ces chiffres correspondent à env. 2T/ha d’acides (soit 23 %) et 7T/ha d’engrais (soit 77 % dont 59-62 % de nitrate de potasse, 22-24 % de nitrate de calcium, 9-10 % de phosphate mono-ammonique, 6-8 % d’oligo-éléments et de sulfates).

C’est le prix des produits sur le marché local qui détermine le coût de la solution, lui-même fonction du marché mondial. Au cours du dollar à la date de la rédaction de cet article, sur le marché marocain, l’acide phosphorique (d = 1.7) coûte 1112 \$/t, l’acide sulfurique (d =1.83) 226 \$/t, l’acide nitrique (d = 1.42) 425 \$/t. En ce qui concerne les principaux engrais solides utilisés, le nitrate de potasse coûte 462 \$/t, le nitrate de calcium 364 \$/t, le MAP 242 \$/t, l’ammonitrate HD 148 \$/t, le sulfate de potasse 367 \$/t et le sulfate de magnésie 360 \$/t.

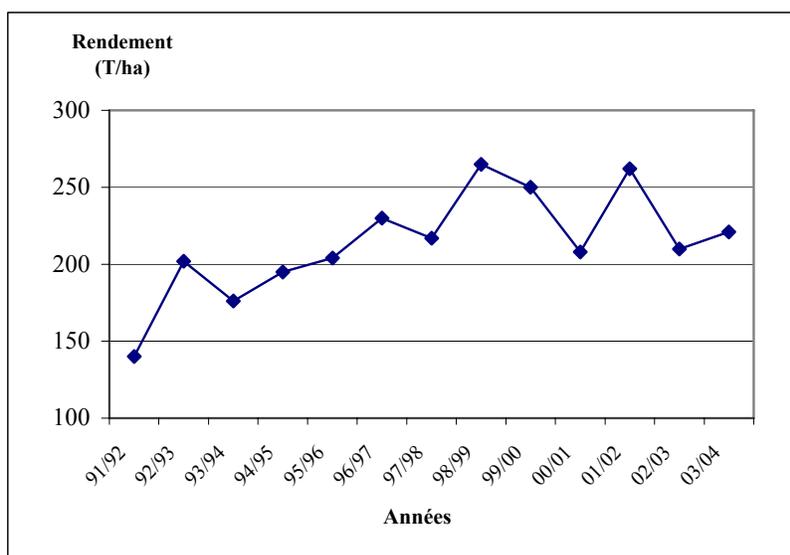
Dans le contexte de production et de consommation de Douiet, le prix de revient de la solution varie de 51.700 à 65.800 Dh (5170 à 6580 \$/ha) selon les années, soit 8 à 10 % du prix de revient de la tomate.

5. Productivité obtenue

Sur ce plan, la courbe des rendements (Fig.1) montre deux périodes caractéristiques :

- la période1, qui s’étale de la mise en place du projet en 88 jusqu’à 1998, avec un rendement en progression continue (R²= 0.78), grâce à l’introduction de nouvelles techniques ;
- la période2 après 1998, avec une variation en dents de scie et tendance nette (R²= 0.13) à l’absence de progrès supplémentaire sur la productivité.

Fig. 1 : Rendement de la tomate ronde sur pouzzolane à Douiet en fonction des années.



L'interprétation des résultats sous le seul angle de la fertigation est loin d'être suffisante, même si entre temps, il y a eu de réels progrès sur cette technique. Voici la liste des principales innovations ayant contribué à l'augmentation du rendement depuis la création du projet, sans qu'il soit bien entendu possible, de faire la part de chacune dans le progrès global constaté :

- Introduction de l'hybride Daniela à potentiel plus important pour remplacer Prisca ;
- Introduction du bourdon pour améliorer la nouaison ;
- Amélioration de l'efficacité du système d'irrigation en remplaçant le capillaire par le goutteur (meilleur coefficient d'uniformité) et en réduisant la longueur de la rampe porte/goutteurs afin d'éviter l'hydromorphie en fin de gouttière dans certains secteurs;
- Introduction des serres multichapelles ;
- Amélioration de la fertigation ;
- Amélioration de la conduite technique.

Ce ne sont là que les techniques intégrées définitivement au processus de production. La liste exhaustive est en fait plus longue et comprend d'autres innovations pour la plupart abandonnées au stade expérimental (production sur laine de roche, sur tourbe blonde, ...), ou retirées peu de temps après, en raison de leur coût exorbitant (chauffage d'appoint à air pulsé, production sur perlite, greffage de plants, ...).

Toutes choses égales, c'est avec le greffage qu'un progrès spectaculaire sur la productivité avait été démontré à Douiet (pic de 300t/ha). Malheureusement l'investissement requis pour un projet de pépinière sur place n'est pas rentable, en raison de la superficie limitée en tomate dans la région.

La tomate est une espèce originaire des régions chaudes, avec des besoins assez élevés en température pour sa croissance. Tout compte fait, c'est le bilan énergétique qui limite la marge de progrès sur le rendement dans le site de culture. Pour la période concernée par la production de tomate de primeur en vue de l'exportation (novembre à avril), ce bilan est loin d'être favorable même avec le chauffage géothermique. Le nombre de bouquets produits par an est beaucoup plus faible par rapport à d'autres zones comme Dakhla (24 contre 28) à bilan énergétique très positif du fait d'une température oscillant constamment entre 14 et 28°C l'hiver comme l'été [Soldini et al, 1997 ; Al Babaallal, 2004].

D'une manière générale, les meilleurs rendements notés correspondent aux années climatiques favorables à hiver moins froid, bien ensoleillées et avec moins de problèmes phytosanitaires.

6. Impact sur la qualité

En ce qui concerne cet aspect, il vaudrait mieux parler de défauts apparents attribuables à la mauvaise nutrition (insuffisance, déséquilibre) ou à l'interaction de la mauvaise nutrition avec d'autres facteurs aggravants tels que l'amplitude thermique, les basses températures nocturnes, la sensibilité variétale,... que de la qualité au sens de Stevens [1979] et du Citfl [2000] qui est un concept beaucoup plus large.

Il n'y a jamais eu d'études sur la valeur gustative spécifique de la tomate de Douiet. Mais des études abondantes existent déjà par ailleurs sur le sujet et montrent que sur ce point, les résultats sont plutôt contradictoires et dépendent plus de la variété et de la saison que du mode de culture lui-même [Mars et al, 1985 ; Citfl, 2000]. Ils sont tantôt en faveur du plein sol et tantôt à l'avantage de la culture sur substrat.

Par contre, l'apport indéniable à mettre à l'actif de Douiet sur le plan qualitatif est celui du progrès considérable réalisé en matière de lutte intégrée afin de produire pour le consommateur, des tomates faisant appel à très peu de pesticides, sinon sans résidus de pesticides [Nouga, 1997].

En 18 ans, on a eu l'occasion de noter toute sorte de défauts qualitatifs signalés dans la littérature sur la tomate : fruit cordiforme, côtelé, collet vert, fissurations, éclatement, ...

Les défauts réels de qualité vécus, parmi ceux qui sont connus pour avoir partiellement comme origine une fertigation inadaptée, sont surtout les problèmes de Blotchy (excès de N, de Ca, insuffisance en K, faible EC,...) au début du cycle, de la tomate creuse (froid couplé à un excès de N, EC faible, K insuffisant, ...), de la tomate molle (EC faible), et très secondairement la nécrose apicale en fin de cycle (EC élevée, insuffisance de Ca, excès de NH₄⁺, de K, de Mg, ..).

Mais dans tous les cas, il n'y a jamais eu de problèmes qualitatifs majeurs à même de compromettre totalement la campagne d'exportation. Souvent le problème reste passager et lié momentanément au climat de la saison. Sur le plan commercial, la qualité de la tomate produite en hors sol à Douiet a plutôt forgé une bonne réputation à l'étranger et a été même à l'origine de marque devenue très célèbre sur le marché européen.

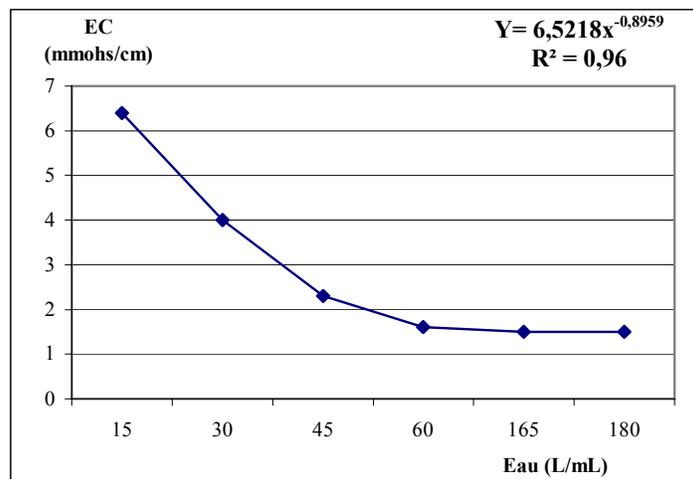
7. Impact sur la durabilité du système

La durabilité d'un système hors sol, peut être compromise par l'apparition subite dans la nature, d'agent pathogène dangereux tel que le Tylc. Mais traditionnellement, le risque peut provenir d'une dégradation lente et irréversible du système, notamment des qualités du substrat, même en conditions de conduite normale.

Traitée sous l'angle de la fertigation, la menace sur la durabilité à Douiet, semble surtout liée à une accumulation dangereuse de sel dans la pouzzolane. Le réduction de l'espace poral par effritement physique, tassement, accumulation de matière organique racinaire,... a engendré une certaine tendance nette à freiner la bonne circulation des excédents de solution dans les gouttières, d'où d'importants dépôts de sels visibles même à l'œil nu, à la surface du substrat.

La figure 2, donne la réaction de la pouzzolane à la lixiviation de l'excès de sel par lavage à l'eau de Douiet. Le taux de sel du substrat diminue selon un modèle de type puissance. Il faut entre 40 et 60 dm³/mL de gouttière si l'on veut ramener la conductivité, de la valeur atteinte après 17 ans d'accumulation (soit 6.4 mmhos/cm), à la valeur asymptotique de 1.5 mmhos/cm. D'autre part, l'expérimentation montre qu'on n'atteint jamais l'EC de l'eau de lavage (soit 0.65 mmhos/cm) et à plus forte raison celle du substrat à l'état vierge (0.1 mmhos/cm), en procédant à des apports supplémentaires d'eau, vraisemblablement en raison de la valeur élevée de la capacité d'échange cationique (tab. 6).

Fig.2 : Evolution de la conductivité de la pouzzolane en fonction du volume de lavage à l'eau douce.



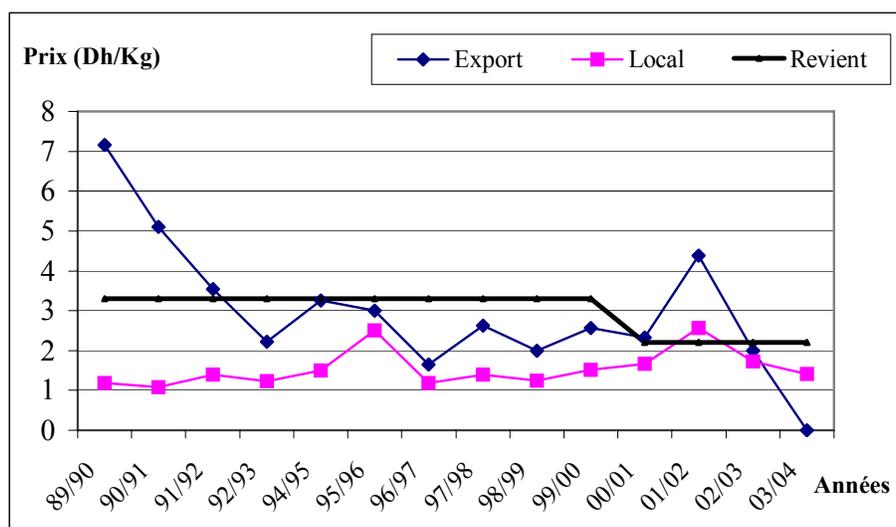
Au stade actuel, le matériau peut être considéré comme fiable pour une productivité de 220-250 t/ha sur 18 ans, à condition de prendre la précaution de rétablir le niveau dans le conteneur en rajoutant chaque année 3 à 5 % pour compenser les pertes sur les côtés et par tassement. Par contre, il est difficile de se prononcer de combien d'années la longévité du système peut être prolongée après ce lavage, quoi que le bon comportement de la tomate (au stade R4 à la date de la rédaction de cet article) laisse présager la possibilité d'encore utiliser le substrat 4 à 5 années de plus, sans baisse significative de productivité.

La durabilité n'est pas seulement une question de performances agronomiques mais aussi de rentabilité.

Sous cet angle économique de la durabilité, l'enseignement vital à tirer de Douiet pour l'avenir, est la nécessité d'une stratégie à plusieurs scénarios de culture, tous exécutables dans les mêmes installations, mais dont l'un sera réalisé et les autres gardés sous la main, pour faire face aux imprévus du marché. Eu égard au volume des investissements engagés dans ce genre de projet, il ne faudrait surtout pas commettre dans l'avenir, l'aberration du scénarios à une seule monoculture et d'attendre de constater l'effondrement des prix, pour commencer à entreprendre la recherche de solutions de rechange.

La figure 3, montre à quel point la rentabilité d'un grand projet, pourtant étudiée avec beaucoup de soins, peut être « zérotée » peu de temps après sa mise en place, en raison de l'effondrement subite et irréversible du prix sur le marché.

Fig.3 : Evolution du prix de la tomate ronde en fonction des années à Douiet.



Le prix de 5 Dh/kg prévu pour la tomate ronde (produit numéro 1 considéré dans le calcul initial de rentabilité) n'a été réalisé que les deux premières années. Il a ensuite chuté de façon draconienne obligeant dès 1993 à engager un long processus de diversification (introduction de la pêche précoce à haute densité, du raisin précoce,...), afin de continuer à assurer une rentabilité minimum. Tout s'était passé, comme si l'étude du projet avait été réalisée la veille de grands changements dont il n'avait pas été tenu compte.

8. Impact sur l'environnement

L'une des interrogations majeures du système de fertigation avec solution perdue est son impact sur l'environnement. En agriculture et en fertigation en particulier, c'est surtout l'azote et le phosphore qui sont mis à l'index en cas d'excès [Bonnieux et Rainelli, 1990 ; Lacaze, 1996]. Le préjudice porté à l'environnement peut être la dégradation de la qualité de l'eau si celle-ci est destinée à un usage domestique ou en le phénomène d'eutrophisation aboutissant à la formation de marées vertes, d'eaux colorées,...voire à la dégradation du milieu aquatique par prolifération algale, désoxygénation et production de toxines [Rosenberg, 1985 ; Lacaze, 1996].

A Douiet, il ne peut y avoir d'impact significatif dans l'état actuel des choses, du fait qu'on est en présence d'un projet unique parfaitement isolé. Les masses absolues de substances en NO_3 et en P drainées par les caniveaux des serres sont très faibles (soit resp. 0.57 et 0.20 kg/ha/j). L'équivalent habitant de pollution, rappelons-le, est dans certains pays fixés à 15 gr/j d'azote et 4 gr/j de P. Le risque aurait été tout naturellement différent si la région était partout parsemée de ce genre de projets avec rejet systématique de fertilisants dans le réseau hydrographique sans transit par le lagunage [Piétrasantà et Bondon, 1994].

D'autre part, il ne faudrait pas oublier que le drainage coïncide avec la période hivernale caractérisée par des vagues de pluie importantes. D'où des concentrations en fin de compte infinitésimales (par effet de dilution), eu égard aux côtes d'alerte décrétées par les divers organismes dont l'OMS (50 ppm de NO_3^- pour les sources destinées à l'eau potable).

Dans les puits superficiels limitrophes ($H < 30\text{m}$), l'analyse réalisée à l'occasion de cette étude, montre des concentrations de l'ordre de 30 mg/L. Mais ce résultat ne peut être

interprété comme étant la conséquence des rejets azotés en provenance de l'hors sol. D'une part, en raison de l'absence de témoin d'avant projet et d'autre part, du fait de la présence dans le voisinage d'autres sources de pollution diffuse comme les étables, le maraîchage plein sol, la grande culture ...

Tab.6 : Concentration en fertilisants des eaux de drainage en provenance des serres (ppm)

| Eléments | NO ₃ ⁻ | P | K | Mg | Ca | Na |
|---------------------|------------------------------|----|-----|----|-----|----|
| Concentration (ppm) | 650 | 25 | 250 | 45 | 110 | 60 |

Le risque des effluents agricoles n'est réel que si ceux-ci empruntent le cycle habituel de pollution. Douiet est le site type où l'on peut faire de l'hors sol un système risque zéro pollution sur l'environnement en recyclant le drainage pour fertiliser la grande culture dans les pivots à côté. Ce qui suppose un bassin d'accumulation équipé de géomembrane pour empêcher toute entrée directe des sels polluants dans le cycle de pollution et d'eutrophisation.

9. Discussion et conclusions

Introduite depuis bientôt 18 ans à Douiet, la fertigation selon le principe Coïc-Lesaint a fait l'objet de nombreux ajustements afin de l'adapter au contexte local de la zone.

Pour des semis de fin juillet/début août en vue d'une exportation de la tomate à partir de fin automne, l'azote doit être diminué. Des concentrations autour de 13 meq/L de N (ammonium compris) sont suffisantes, sinon le plant réagit, sous l'effet aggravant des fortes chaleurs de fin d'été, par un feuillage surabondant, une mauvaise nouaison et un premier étage de bouquet anormalement haut (60-80 cm).

Dans ce contexte climatique, on a été souvent amené les premières semaines à agir sur la salinité (EC > 2.5 mmhos/cm) pour empêcher le plant de trop filer.

Pour les quatre cations considérés importants dans la méthode, nous avons été surtout frappés au départ par la présence d'excès de Ca dans le drainage. L'antagonisme avec les autres cations (K, Mg, Na) a été le premier suspecté. Mais la forte présence d'oxalate de calcium dans le fruit n'était pas favorable à cette hypothèse. Le phénomène a duré plusieurs années consécutives sans que l'on en détermine l'origine. Les recherches dans les dossiers d'avant projet, ont finalement montré que le Ca provenait en fait du substrat de culture. Tout se passe comme si la pouzzolane perdait son calcium de réserve par appauvrissement du complexe d'échange et par dissolution lente de son calcaire, sous l'effet de l'acidité de la fertigation.

Comme dans les calculs des solutions ce calcium endogène n'était pas pris en compte, la concentration finale de l'élément dans le substrat devient très défavorable à l'absorption du magnésium, ce qui explique en partie l'apparition systématique en hiver, de carences aiguës en Mg sur les premiers étages foliaires.

L'expérience sur ce site de culture a également montré, que c'est surtout durant les périodes hivernales froides et par temps couvert, qu'il faudrait surveiller l'alimentation en K pour éviter les fruits creux et les problèmes de fermeté.

Les équilibres en macro éléments n'ont pas été les seuls à faire l'objet d'adaptation à Douiet, mais aussi les oligo-éléments. Les concentrations conventionnelles proposées par Coïc-Lesaint, se sont souvent avérées insuffisantes pour répondre au besoin de la plante, en particulier pour le fer. Le phénomène de la chlorose ferrique, très visible sur le feuillage, par temps froid et couvert, oblige à doubler les concentrations, voire certaines campagnes à intervenir par voie foliaire en utilisant des cocktails prêts pour l'emploi. Par contre, contrairement aux habitudes inculquées aux techniciens, on n'observe pas d'efficacité

particulière liée au fer chélaté type EDDHA par rapport aux autres formes. Compte tenu des plages réelles de pH du milieu (5.8-6.2), l'expérience a montré que des molécules chélatées moins élaborées et moins coûteuses comme Fe-DTPA, Fe-HEDTA donnent les mêmes résultats.

Quoi qu'on soit inscrit durant longtemps dans une stratégie de gestion de drainage plus soucieuse des risques de salinisation (25-30 %), le substrat a réagi au bout de 17 ans de culture par une augmentation accrue de salinité. Ce qui a exigé un lavage avec d'importants volumes d'eau douce avant de le ressemer pour une année de plus. Par conséquent, d'après cette première expérience sur la pouzzolane locale du Maroc, le matériau peut être considéré comme fiable sous fertigation, pour une productivité de 220-250 t/ha sur une période d'au moins 18 ans. Sous réserve d'une bonne désinfection et de prendre la précaution de rétablir régulièrement le niveau dans les containers.

Bien entendu, la problématique des grands projets d'hors sol, n'est plus une question de maîtrise de la fertigation ou des techniques de production en général. Au Maroc, il y a tout ce qu'il faut comme ressources humaines et moyens technologiques (mises au point sur place ou importées de l'étranger) pour y parvenir, à condition d'y mettre le prix.

Les vrais risques qui planent sur l'activité viennent aujourd'hui du manque de visibilité sur le marché de l'Export pour sécuriser l'investisseur, à cause de l'instabilité des prix.

Références bibliographiques

- Aït Houssa A., 1998 : Cours fertigation de 3^{ème} Cycle. Département d'Agronomie. ENA Meknès –Maroc.
- Al Babaallal, 2004 : Observations réalisées sur la tomate au Domaine Agricole de Dakhla.
- Bonnieux F., Rainelli P., 1990 : Fonction de dommage à l'environnement et pollution par les nitrates d'origine agricole. Colloque International Nitrates- Agriculture- Eau organisé par Inra-France. Paris La Défense novembre 7-8 : 576 p.
- Bucks D., Nakayama F.S., 1980: Injection of fertilisers and other chemicals for drip irrigation. U.S Depart for Agricultural, pp 166-180.
- Chossat J.C. 1995 : Entretien en micro-irrigation. Etudes du Cemagref, Série équipements pour l'eau et l'environnement n°19 : 73 p.
- Citfl., 1986 : Cultures légumières sur substrats, ouvrage collectif, 2^{ème} édition, 276 p.
- Citfl., 2000 : Tomate pour un produit de qualité, ouvrage collectif, 222 p.
- Coïc Y., Lesaint C., 1973 : La nutrition minérale et en eau des plantes en horticulture avancée. Document technique de la SCPA n° 23, 21p.
- Cornillon P., 1985 : Influence de la température des racines sur la croissance et la nutrition des plantes. Les cultures hors sol. Les Actions Thématiques Programmées de l'Inra France : 221-234 pp.
- Couteaudier Y., Louvet J., Alabouvette C., 1985 : Les problèmes pathologiques en hors sol. Les cultures hors sol. Les Actions Thématiques Programmées de l'Inra France : 321-232 pp.
- Gorini F., 1997: Guide complet de la culture des tomates. Editions de Vecchi S.A, 20, rue de la trémoille, 75000 Paris : 111p.
- Jeannequin B., 1985 : Fertilisation de la tomate en culture hors sol en région méditerranéenne. Les cultures hors sol. Les Actions Thématiques Programmées de l'Inra France, 235-236 pp.
- Lacaze J.C., 1996 : L'eutrophisation des eaux marines et continentales. Ellipses/Editions marketing S.A, 32 rue Bague, Paris (15^{ème}) : 191 p.

- Mars Simone., Otto Christine., Blanc Denise., 1985 : La qualité de la tomate. Influence du substrat et de la nutrition. Les cultures hors sol. Les Actions Thématiques Programmées de l'Inra France : 347-350 pp.
- Nouga M., 1997 : Les Résultats de la lutte intégrée en cultures protégées au Domaine Douiet. Journées d'information. Doc. de synthèse, Domaine Agricole de Douiet, Maroc.
- Ouknider M., Aït Houssa A., 1994: Résultats d'essais de Solupotasse au Maroc. Journées Solupotasse, Anvers 27 et 28 juin, 13pp.
- Piétrasantà Y., Bondon D., 1994 : Le lagunage écologique. Ed. Economica. 49, rue Hericart, 75015 Paris: 111p.
- Rosenberg, 1985 : Eutrophication- The Future Marine Coastal nuisance ?, Mar. pollut. bull. 16(6), 227-231pp.
- Soldini J., Nadori E.B., Aït Houssa A., 1997 : Le Projet Tiniguir, 7 ans après. Bulletin Interne, DDA, 2-3 pp.
- Stevens A., 1979: Tomato quality: Potential for developing cultivars with improved flavor. Acta horticulturae, 93, 317-329 pp.
- Verdure M., 1985 : Calcul de la composition de la solution nutritive Coïc-Lesaint. Centre Impression, Limoges, France 31 p.

Annexes

1ère E -F2

| | Solution file (meq/L) | | | | | | | | |
|--|-----------------------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| | K ⁺ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | NH ₄ ⁺ | H ₃ O ⁺ | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | HPO ₄ ⁻ | SO ₄ ⁻ |
| Eau | 0.02 | 2.99 | 2.44 | | | | | | 0.33 |
| HNO ₃ ⁻ | | | | | 0.54 | 0.54 | | | |
| H ₂ SO ₄ | | | | | 2.68 | | | | 2.68 |
| H ₃ PO ₄ | | | | | 0.78 | | | | |
| NH ₄ H ₂ PO ₄ | | | | 0.60 | | | 0.60 | | |
| Nit.de Ca | | 5 | | | | 5 | 0.78 | | |
| KNO ₃ | 5 | | | | | 5 | | | |
| MgSO ₄ | | | 1.4 | | | | | | 1.4 |
| NH ₄ NO ₃ | | | | 0.5 | | 0.5 | | | |
| Σ ions | 5.02 | 7.99 | 3.84 | 1.1 | 4 | 11.04 | 1.38 | | 4.41 |

F6 – R2

| | Solution file (meq/L) | | | | | | | | |
|--|------------------------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| | K ⁺ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | NH ₄ ⁺ | H ₃ O ⁺ | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | HPO ₄ ⁻ | SO ₄ ⁻ |
| Eau | 0.02 | 2.99 | 2.44 | | | | | | 0.33 |
| HNO ₃ ⁻ | | | | | 0.75 | 0.75 | | | |
| H ₂ SO ₄ | | | | | 2.68 | | | | 2.68 |
| H ₃ PO ₄ | | | | | 0.58 | | 0.58 | | |
| NH ₄ H ₂ PO ₄ | | | | 1,04 | | | 1.04 | | |
| Nit.de Ca | | 3 | | | | 3.0 | | | |
| KNO ₃ | 7.0 | | | | | 7.0 | | | |
| MgSO ₄ | | | 1.09 | | | | | | 1.09 |
| NH ₄ NO ₃ | | | | 0.36 | | 0.36 | | | |
| Σ ions | 7.02 | 5.99 | 4.08 | 1.4 | | 11.11 | 1.62 | | 4.1 |

R2 – Fin culture

| | Solution fille (meq/L) | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| | K⁺ | Ca⁺⁺ | Mg⁺⁺ | NH₄⁺ | H₃O⁺ | NO₃⁻ | H₂PO₄⁻ | HPO₄⁻ | SO₄⁻ |
| Eau | 0.02 | 2.99 | 2.44 | | | | | | 0.33 |
| HNO₃⁻ | | | | | 1.4 | 1.4 | | | |
| H₂SO₄ | | | | | 1.63 | | | | 1.63 |
| H₃PO₄ | | | | | 0.9 | | 0.90 | | |
| NH₄H₂PO₄ | | | | 1.0 | | | 1,0 | | |
| Nit.de Ca | | 3.0 | | | | 3.0 | | | |
| KNO₃ | 7.0 | | | | | 7.0 | | | |
| K₂SO₄ | 1.0 | | | | | | | | 1.0 |
| MgSO₄ | | | 0.89 | | | | | | 0.89 |
| NH₄NO₃ | | | | 0.29 | | 0.29 | | | |
| Σ ions | 8.02 | 5.99 | 3.33 | 1.29 | 3.93 | 11.69 | 1.90 | | 3.85 |