



MICROFICHE N°

07569

République Tunisienne

الجمهورية التونسية
وزارة الفلاحة

MINISTRE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

تونس

F

1

CODA 7569

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION GENERALE DE
LA PRODUCTION VEGETALE

LES DOCUMENTS TECHNIQUES

de l'utilisation de la géothermie dans le
chauffage des cultures sous-serres

Volume N° III

Pages 200 à 276

(Fertilisation & Irrigation)

Publié en Janvier 1991

Projet PNUD/TUN 85/004

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION GENERALE DE
LA PRODUCTION VEGETALE

LES DOCUMENTS TECHNIQUES

de l'utilisation de la géothermie dans le
chauffage des cultures sous-serres

Volume N° III

Pages 200 à 276

(Fertilisation & Irrigation)

Publié en Janvier 1991

Projet PNUD/TUN 85/004

SOMMAIRE

	PAGE
- La conduite de la fertilisation en cultures maraichères sous serre	200
- La conduite de l'irrigation localisée sous serre	209
- La fertilisation en irrigation localisée	215
- Etude comparative de différents systèmes d'irrigation localisée et goutte à goutte	277
- Les éléments nutritifs dans la plante, 1ère partie : les MACROELEMENTS	232
- Les éléments nutritifs dans la plante, 2ème partie : Les MICROELEMENTS	246
- Fiche d'irrigation de tomate, melon et fakkous sous serre	254
- L'humidification des serres.	261

NOTE DE PRESENTATION

Depuis le démarrage des cultures sous-abri plastique au début des années 70, la Tunisie s'était proposée de développer sa production et son exportation de légumes de primeurs. Et après plusieurs années de travail, on a pu sérier les contraintes rencontrées pour réaliser cet objectif ; on peut en citer particulièrement les températures nocturnes trop basses même dans les régions côtières, la maîtrise de l'état sanitaire des cultures et de leur fertilisation ainsi que la bonne connaissance des marchés d'exportation et de leurs exigences.

Pour lutter contre les basses températures, et après plusieurs tentatives d'utilisation de différents types de chauffage on a commencé au milieu des années 80 à développer les possibilités d'utilisation des eaux géothermales dans différents sites du sud et du centre tunisiens, où existent des disponibilités importantes de ces eaux.

Le projet PNUD TUN 85/004 concernant les cultures sous serres chauffées par les eaux géothermales a permis de créer une sensibilisation autour des réalisations en la matière, d'assurer le suivi de ces réalisations ainsi que la formation d'un certain nombre de techniciens régionaux dans ce domaine notamment à travers une dizaine de séminaires de formation effectués entre 1988 et 1990 dans les régions concernées.

Les documents utilisés par les formateurs au cours de ces séminaires étaient ronéotypés et préparés en un nombre limité. Aujourd'hui, ce nombre ne permet pas leur diffusion à l'ensemble des régions et des ingénieurs et techniciens qui pourraient en avoir besoin dans le cadre du développement que connaît actuellement la géo-serriculture.

Aussi, et avec le gracieux accord du PNUD, avons-nous décidé de publier dans le cadre de cette série de volumes, les principaux documents qui ont été préparés et utilisés pour ces séminaires après leur groupage par thème. On pense que l'ingénieur et le technicien y trouveront beaucoup d'intérêt, (même si quelques répétitions sont observées) et ce, que se soit pour la réalisation de leur activité

d'encadrement quotidien des agriculteurs ou pour l'extension de l'utilisation des eaux géothermales pour le chauffage de nouvelles superficies de serres.

Bien entendu, on espère que le développement du secteur et le suivi minutieux par l'ensemble des cadres qui s'y intéressent permettra de perfectionner nos connaissances à chaque campagne. Aussi est-il nécessaire pour tous les cadres régionaux de maintenir le contact avec la cellule "Geothermie" de la Direction Générale de la Production Végétale afin d'améliorer continuellement ce premier référentiel technico-économique.

**Le Directeur Général de
la Production Végétale**

MALEK BEN SALAH

LA CONDUITE DE LA FERTILISATION EN CULTURES MARAÎCHÈRES SOUS SERRE *

En matière de fertilisation nous pouvons considérer :

- la matière organique
- la fertilisation minérale

1. La matière organique

La matière organique est très importante en cultures maraîchères car l'humus stable avec l'argile forment le complexe absorbant du sol et est donc un paramètre de la richesse du sol, influençant favorablement les résultats culturaux. La matière organique (M.O) est également un facteur important de la résistance au sel ou de la tolérance à l'irrigation avec de l'eau saumâtre. De plus élevé qu'est le taux en M.O, de plus que les plantes peuvent tolérer la salinité.

La matière organique fraîche se décompose dans une première phase assez rapidement en :

- minéraux (minéralisation)
- humus stable (humification)
- produits gazeux (CO_2 , CH_4 , N_2O , etc...)

L'humus stable se minéralise à son tour assez lentement aussi.

La minéralisation de la matière organique fraîche se fait selon le rythme suivant :

- pour l'azote : 2/3 la première année, 1/3 l'année suivante.
- pour le potasse : la moitié la première année et l'autre moitié la deuxième année.
- pour le phosphore un tiers la première année, le deuxième tiers la 2^{ème} année et le dernier tiers la 3^{ème} année.

Les matières organiques se caractérisent par 4 facteurs :

* 1er Séminaire National de formation dans le cadre du Projet Géothermie PNUD/TUN/85/004 Sidi Bouzid, 14 Juillet 1988.

- la relation C/N
- le taux annuel de minéralisation de l'humus stable (K2)
- le coefficient iso-humique (K1)
- le rendement en humus stable.

La relation C/N nous donne une indication sur le degré de fermentation de la matière organique. De plus faible qu'est cette relation de plus que la matière organique est décomposée. A titre indicatif on peut citer les relations C/N moyennes suivantes :

- humus stable	8-10
- M.O libre du sol	15-20
- compost	10-20
- fumier décomposé	15-20
- fumier pailleux	20-40
- paille	50-80

Le coefficient K2 ou le taux annuel d'humus stable qui se minéralise dépend surtout du climat, du sol et des travaux culturaux. Ce taux est plus élevé en sol léger et en sol calcaire et sous climat chaud. Il est plus faible avec une teneur élevée en argile et en limon fin. Le taux de minéralisation des sols exploités en cultures maraîchères est de :

- * 2% en Belgique et au Nord de la France
- * 3% au Sud de la France
- * 4% dans les serres du Sud de la France
- * 5-6% dans les serres du Sud Tunisien.

Le coefficient K1 ou le coefficient iso-humique est le rendement en humus stable des matières organiques fraîches ; c'est la quantité d'humus stable restant 3ans après l'enfouissement et exprimé par rapport à la matière sèche enfouie.

Le calcul de la quantité ou du rendement en humus stable nécessite la connaissance de la teneur en matière sèche et du coefficient iso-humique. La quantité d'humus stable est obtenue en multipliant le poids de la matière organique avec le taux de matière sèche et le taux K1. Le taux d'humus stable est obtenu en multipliant la teneur en matière sèche avec le coefficient iso-humique K1. Le taux K1, le rendement en humus stable et le taux d'humus stable de différentes matières organiques sont présentés dans le tableau ci-dessous.

produit	Teneur M.S	Rend en	Taux kg/T	Rend en	Taux H.S
	% (1)	M.S kg/T		H.S. kg/T	%
fumier bien décomposé	0.2	200	0.5	100	0.1
fumier moyennement décomposé	0.22	220	0.35	77	0.077
fumier pailleux	0.25	250	0.25	62.5	0.063
paille	0.85	850	0.14	119	0.119
compost	0.25	250	0.2-0.5	50-125	0.05-0.125
résidus de récolte	0.2	200	0.135	27	0.027
engrais vert	0.2	200	0.2	40	0.04

(1) M.S. = Matière sèche

(2) H.S. = humus stable

La restitution d'humus par les récoltes est possible par l'utilisation de la technique d'enfouissement des restes des récoltes. Cette technique est très utilisée en grandes cultures, mais peu utilisée en cultures maraîchères sous serre afin d'éviter les problèmes des résidus et maladies. Par contre pour le maraîchage de plein champ cette technique est envisageable. Le tableau ci-dessous donne une idée de la restitution en humus stable par les résidus des récoltes.

Grandes cultures (kg humus/ha)			Maraîchage (kg humus/ha)	
Culture	Racines	Aérien	Culture	Racines + feuilles
Betterave	120	320	Carotte	430
Pomme de terre	120	-	Chou fleur	300
Mais à grain	300	480	Haricot	530
Luzerne annuelle	400	120	Oignon blanc	65
Pois de conserve	225	200	Oignon coloré	120
Blé	300	600	Pois	255
Orge	150	375	Tomate	260
Engrais vert	150	320	Melon-concombre	230

La teneur en M.O souhaitée sous serre dépend de la texture et de la teneur en argile. Sous serre on admet pour une texture grossière, moyenne et fine respectivement des teneurs minimales en M.O de 3,5 et 6% pour obtenir des bons résultats culturaux.

$2500\text{m}^3 \times 1.4\text{T}/\text{m}^3$ soit $3500\text{ T}/\text{ha}$. Si la teneur en M.O est de 0.5% le poids de la matière organique est de $3500\text{ T} \times 0.5 / 100 = 17,5\text{ T}/\text{ha}$. Sous serre les pertes annuelles atteignent 6% soit $17,5\text{ t}/\text{ha} \times 6 / 100 = 1,050\text{ T}/\text{ha}$ d'humus stable, ce qui correspond à $10,5\text{ T}/\text{ha}$ de fumier bien décomposé.

Le redressement avec 0,25% de M.O pour atteindre une valeur de 0.75% de M.O nécessite un apport de $3500\text{ T}/\text{ha} \times 0,25 / 100 = 8,75\text{ T}/\text{ha}$ d'humus stable, soit $87,5\text{ T}/\text{ha}$ de fumier décomposé. Le redressement de la matière organique d'un sol grossier calcaire de 0,5% à 3,5% pour une couche de 25cm de profondeur peut se faire en augmentant durant les premiers 5 ans le taux de M.O annuellement avec 0.3% durant la deuxième période de 5 ans avec 0,2% et durant la dernière période de 5 ans avec un taux de 0.1%. L'évolution des apports en M.O et fumier décomposé est donné par le tableau ci-dessous :

M.O (%) Humus stable (T/ha)						
année	Teneur actuelle	Teneur visée	Redressement	Pertes	Apport T/ha	Fumier décomp. T/ha
1	0,5	0,8	10,5	1,05	11,55	115,5
2	0,8	1,1	10,5	1,68	12,18	121,8
3	1,1	1,4	10,5	2,31	12,81	128,1
4	1,4	1,7	10,5	2,94	13,44	134,4
5	1,7	2,0	10,5	3,57	14,07	140,7
6	2,0	2,2	7	4,20	11,20	112,0
7	2,2	2,4	7	4,62	11,62	116,2
8	2,4	2,6	7	5,04	12,04	120,4
9	2,4	2,8	7	5,46	12,46	124,6
10	2,8	3,0	7	5,88	12,88	128,8
11	3,0	3,1	3,5	6,30	9,80	98,0
12	3,1	3,2	3,5	6,51	10,01	100,1
13	3,2	3,3	3,5	6,72	10,22	102,2
14	3,3	3,4	3,5	6,93	10,43	104,3
15	3,4	3,5	3,5	7,14	10,64	106,4
16	3,5	3,5	-	7,35	7,35	73,5

En pratiquant un apport de 5 T de fumier décomposé par serre, soit $100\text{ T}/\text{ha}$ sur un sol contenant 0,5% de M.O, le taux de M.O montera comme suit si on admet que le sol est du type calcaire à texture grossière (densité : 1,4) et que l'on exploite 25cm de profondeur soit $3500\text{ T}/\text{ha}$ (voir tableau ci-dessous).

année	Taux M.O	H.S à restituer T/ha	Apport. H.S T/ha	H.S pour redrssement	Taux augmentation M.O
1	0.5	1.05	10	8.95	0.256
2	0.756	1.58	10	8.42	0.240
3	0.996	2.09	10	7.91	0.226
4	1.222	2.566	10	7.434	0.212
5	1.434	3.012	10	6.988	0.197
6	1.631	3.426	10	6.574	0.188
7	1.819	3.811	10	6.180	0.177
8	1.996	4.191	10	5.809	0.166
9	2.162	4.540	10	5.460	0.156
10	2.320	4.870	10	5.130	0.147
11	2.470	5.180	10	4.820	0.138
12	2.610	5.480	10	4.520	0.129
13	2.740	5.750	10	4.250	0.121
14	2.860	6.000	10	4.000	0.114
15	2.970	6.240	10	3.760	0.107
16	3.080	6.470	10	3.530	0.101
17	3.180	6.680	10	3.320	0.095
18	3.270	6.867	10	3.133	0.089
19	3.360	7.056	10	2.944	0.084
20	3.440	7.224	10	2.776	0.079
21	3.520	-	-	-	-

(1) M.O = Matière organique

(2) H.S = humus stable

2. La fertilisation minérale

2.1. Introduction.

En matière de fertilisation minérale on doit se poser les questions suivantes en ce qui concerne les apports :

- la quantité
- le moment et l'échelonnement des apports
- la forme des apports

Afin de pouvoir répondre complètement à ces questions, on doit connaître les exigences de la plante (les besoins totaux ou les exportations, le rythme d'absorption, le rôle des éléments vis à vis du climat et des conditions culturales notamment le milieu et les techniques culturales. Parmi les actions du milieu il faut surtout tenir compte de la minéralisation du fumier dans le calcul des apports

des fertilisants, tandis que dans un sol pauvre on considère la fumure seulement comme amélioration du taux de M.O et les besoins en fertilisants sont complètement donnés sous forme d'engrais chimique. Les besoins totaux de la culture sont assez bien connus par les travaux réalisés par Cornillon (INRA-Montfavet), ce qui nous permet donc d'adopter la fertilisation totale aux besoins spécifiques et ponctuelles de la culture.

2.2. Les exportations globales.

Les exportations en éléments principaux d'une culture sont données par référence à sa productivité. On exprime donc les exportations par rapport à l'unité de rendement (t/ha). Pour connaître les exportations d'une culture avec un rendement donné ou supposé il faut donc multiplier les normes avec le nombre de tonnes récoltées. Le tableau ci-dessous donne les normes méditerranéennes pour quelques espèces cultivées sous serre.

culture	exportation en kg/tonne de fruits				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
tomate	2,7	1,2	5,4	3,3	0,65
melon	3,9	1,7	6,9	5,0	1,70
piment	4	1	5	3	0,7
concombre	2	1,25	3	1,5	0,5
aubergine	7	1,4	7,5	?	0,8
pastèque	?	?	?	?	?

Une fois les besoins en fertilisants de la culture sont connus on peut préparer un schéma d'application. En fertilisation classique on distribue la totalité des engrais phosphatés et la moitié des engrais potassiques avant l'installation de la culture ensemble avec la fumure organique. Dans des sols pauvres cet apport peut se faire d'une façon localisée sur les lignes de cultures à condition de très bien mélanger et bien enfouir les engrais. L'autre moitié et la totalité des engrais azotés sont à distribuer en cours de culture, notamment à partir de 3 semaines après le repiquage ou 4 semaines après le semis direct. On cesse les apports d'azote environ 2 à 3 semaines avant la fin de la culture et les apports de potasse 4 à 6 semaines avant la fin de la culture. En connaissant le cycle cultural et la durée de la culture on peut donc déterminer la période durant laquelle on distribuera les engrais. En principe les engrais azotés sont donnés sous forme d'ammonitrite ou sous forme de nitrate de

potasse à raison de 2 ou 3 apports par mois et les engrais potassiques sous forme de sulfate ou nitrate de potasse à raison de 1 à 2 apports par mois. En irrigation classique à la raie il convient de majorer la dose sensiblement car chaque irrigation lessive une bonne quantité de l'azote et aussi de la potasse. Même en irrigation localisée les engrais, surtout azotés, migrent au fur et à mesure en dehors de la zone racinaire. C'est pour cette raison qu'il convient de faire des apports fréquents en petite quantité des engrais. La distribution manuelle semble assez difficile à réaliser à ce niveau et il convient de distribuer les engrais soit lors de chaque irrigation à la raie en le diluant en début de la rigole (sac en jute), ou en le distribuant par le système d'arrosage localisée à raison de 2 à 3 fois par semaine.

Exemple de calcul

Une culture de tomate avec un rendement de 100 t/ha et cultivée par semis direct du 1er novembre jusqu'au 15 mai a les besoins d'engrais suivants :

270 unités d'azote

120 unités de P_2O_5

540 unités de K_2O

A la préparation nous distribuons la totalité du P_2O_5 soit 265 kg de super 45 par ha (13.25 kg par serre) et la moitié de la potasse soit 540 kg de sulfate de potasse 50% par ha (27 kg par serre). A partir du 1 décembre et jusqu'au 1 mai il y aura 15 apports d'azote à raison d'un apport chaque 10 jours. Chaque apport d'azote comprendra 2.7kg d'ammonitre 33% par serre (270 unités d'azote correspondent à 810 kg d'ammonitre 33% par ha, soit 54 kg d'ammonitre par ha par apport, soit 2.7kg d'ammonitre par serre).

La potasse sera apportée à raison de 5 apports (1 apport mensuel) de 108 kg de sulfate de potasse 50% par ha soit 5.4kg par serre pour la conduite de la fertilisation en irrigation localisée.

Analyses du sol et leur appréciation

% en M.O : sol limoneux : 60 à 80 g/kg de sol

sol sablonneux : 40 à 60 g/kg de sol (30 - 35 g/kg est déjà bon)

C/N : 10 (8 à 12)

+ 15 : minéralisation est trop lente

- 8 : transformation est rapide - pertes

K (K_2O) : pauvre : < 0.16 g K/kg ou < 0.20 g K_2O /kg
 moyen : 0.16-0.33.....0.20-0.40
 riche : 0.33-0.66.....0.40-0.60
 très riche : > 0.66.....> 0.80

en terre calcaire : 10 mg K_2O par % d'argile

en terre non calcaire : 8 mg K_2O par % d'argile (de 10-25%)

7mg.....(de25-35%)

6mg.....(>35%)

10mg.....(<10%)

P (P_2O_5).....pauvre.....< 0.10 g P_2O_5 /kg

moyen.....0.10 à 0.20

elevé.....> 0.20

N.....faible.....< 1g N/kg de sol

assez bien.....1-1.5

normal.....1.5-2

bien.....2-3

riche.....> 3

LA CONDUITE DE L'IRRIGATION LOCALISEE

SOUS SERRE *

1. Les besoins en eau des cultures sous serre

La consommation d'eau d'une culture a plusieurs origines, notamment :

- l'évaporation d'eau à la surface du sol
- la transpiration de la plante (pour la régulation de sa température et pour la circulation de la sève)
- l'eau de constitution de la plante
- les pertes par ruissellement et par drainage

Les pertes par ruissellement et drainage doivent être réduites au minimum et en utilisant un arrosage localisé du type goutte à goutte, elles sont négligeables et maîtrisables. Un léger surdosage permanent de l'irrigation est favorable si le drainage est possible (sol sablonneux ou existence de drains) et permet d'éviter les problèmes de salinité.

Les besoins pour la constitution de la plante sont faibles. Une culture de tomate produisant 100 T/ha a besoin pour sa constitution environ 100 M³/ha (100 T de fruits à raison de 95% d'eau, soit 95 T, et environ 5 T pour la végétation, soit en total 100 T ou 100 m³ d'eau par ha, soit 10 mm).

La connaissance des besoins en eau correspond donc à ceux de l'évaporation et de la transpiration, donc à l'évapotranspiration, qui dépend surtout de l'état du sol, de l'état du couvert végétal et des facteurs climatiques (insolation, température, hygrométrie, vitesse du vent). L'évapotranspiration correspond donc au passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur et ceci en fonction du climat, plus particulièrement de l'énergie solaire reçue. En conditions favorables près de 70% de l'énergie solaire reçue est utilisée par l'évapotranspiration (ET). Si le sol fournit l'eau à la demande et si le couvert végétal est continu l'évapotranspiration est maximale (ET_m) et elle est égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ET est

* 1er Séminaire National de formation dans le cadre du Projet Coesthermie PNUD/TUN /85/004 Sidi BOUZID, 14 Juillet 1988.

LA CONDUITE DE L'IRRIGATION LOCALISEE

SOUS SERRE *

1. Les besoins en eau des cultures sous serre

La consommation d'eau d'une culture a plusieurs origines, notamment :

- l'évaporation d'eau à la surface du sol
- la transpiration de la plante (pour la régulation de sa température et pour la circulation de la sève)
- l'eau de constitution de la plante
- les pertes par ruissellement et par drainage

Les pertes par ruissellement et drainage doivent être réduites au minimum et en utilisant un arrosage localisé du type goutte à goutte, elles sont négligeables et maîtrisables. Un léger surdosage permanent de l'irrigation est favorable si le drainage est possible (sol sablonneux ou existence de drains) et permet d'éviter les problèmes de salinité.

Les besoins pour la constitution de la plante sont faibles. Une culture de tomate produisant 100 T/ha a besoin pour sa constitution environ 100 M³/ha (100 T de fruits à raison de 95% d'eau, soit 95 T, et environ 5 T pour la végétation, soit en total 100 T ou 100 m³ d'eau par ha, soit 10 mm).

La connaissance des besoins en eau correspond donc à ceux de l'évaporation et de la transpiration, donc à l'évapotranspiration, qui dépend surtout de l'état du sol, de l'état du couvert végétal et des facteurs climatiques (insolation, température, hygrométrie, vitesse du vent). L'évapotranspiration correspond donc au passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur et ceci en fonction du climat, plus particulièrement de l'énergie solaire reçue. En conditions favorables près de 70% de l'énergie solaire reçue est utilisée par l'évapotranspiration (ET). Si le sol fournit l'eau à la demande et si le couvert végétal est continu l'évapotranspiration est maximale (ETm) et elle est égale à l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ET est

* 1er Séminaire National de formation dans le cadre du Projet Coesthermie PNUD/TUN /85/004 Sidi BOUZID, 14 Juillet 1988.

réduite si le sol ou le végétal ou les deux ensemble limitent les pertes d'eau. Sous serre l'ET est surtout lié au rayonnement solaire pénétrant sous serre, l'agitation de l'air devenant d'importance secondaire.

2. Mesure ou calcul du rayonnement global sous serre (Rgs ou Gs)

Le rayonnement global sous serre peut être mesuré directement sinon il peut être calculé à partir du rayonnement global extérieur (Rg ou G). La mesure directe du Rgs peut être faite par pyranomètre (pile de kipp) installée sous la serre. Il peut être également calculé à partir du rayonnement global (Rg) mesuré à l'extérieur par pile de kipp ou à partir de la durée d'insolation. Dans le premier cas le calcul se fait en multipliant le Rg avec un facteur de transparence pour la serre. Pour des films de couverture PE et EVA ce facteur de transparence est de respectivement 0,75 et 0,78 la première année et de respectivement 0,68 et 0,72 la deuxième année. Dans le deuxième cas on peut calculer le rayonnement global extérieur à partir de la formule suivante : $R_g = G_o (0,62 ss/sso + 0,17)$

avec : ss = durée moyenne d'insolation mesurée par héliographe

sso = durée astronomique de la journée (fourni par la météo)

G_o = rayonnement aux confins de l'atmosphère

A partir de septembre 1988 les rayonnements globaux extérieurs seront enregistrés à plusieurs endroits (Zerkine, Smida, Tozeur, Gafsa, Sidi Bou Zid et Chebika). La diffusion régulière de ces données aux vulgarisateurs permettra de calculer les besoins journaliers pour le Centre et le Sud.

3. Calcul de l'évapotranspiration sous serre (ETPs)

Le calcul de l'ETPs peut se faire avec 3 formules, notamment :

- ETPs = 0,46 Rgs (Riou et Benzarti)
- ETPs = 0,62 Rgs - 0,8 (Hammami et Verlodt)
- ETPs = 0,67 Rgs - 0,2 (Musard et Wacquant)

L'utilisation de ces 3 formules donne des résultats très différents pour un gamme de rayonnements comme le montre le tableau ci-dessous.

Rgs	ETRs (R&B)	ETRs (H&V)	ETRs (M&W)
150	1,17	0,78	1,52
200	1,57	1,32	2,09
250	1,96	1,85	2,66
300	2,35	2,37	3,23
350	2,75	2,90	3,80
400	3,14	3,43	4,37
450	3,53	3,96	4,95
500	3,92	4,49	5,52
550	4,32	5,02	6,09
600	4,71	5,55	6,66

Il est évident que la formule mise au point en France surestime les besoins en Tunisie (l'effet économiseur d'eau de la serre se fait sentir davantage sous climat plus rigoureux). La formule de Riou établie dans la région de Tunis à partir d'un gazon Kikuyu conduit sur case lysimétrique est utilisable sans coefficient de rationnement car la culture couvre complètement le sol et l'humectation a été réalisée sur la surface totale cultivée. Si on veut drainer il faut donc surdoser en multipliant l'ETPs avec un coefficient 1,1 à 1,15. La formule de Hammami a été établie pour une culture de tomate tuteurée et dans ce cas on peut utiliser un facteur de rationnement. Néanmoins il est préférable de surdoser légèrement en n'utilisant pas le coefficient de rationnement et de créer un léger drainage pour éviter les problèmes de salinité.

En outre, la formule de Hammami a été calculée pour une culture installée le 10 février et terminée fin juin, tandis que la formule de Riou a été calculée sur une année complète. Pour ces raisons il est évident que pour des valeurs faibles du rayonnement et plus particulièrement pour la période située entre le 10 Novembre et le 1 Février, la formule de Hammami est moins fiable que la formule de Riou tandis que pour des valeurs de rayonnement dépassant 250 cal/cm² la formule de Hammami est la plus adaptée car calculée sur une culture maraîchère tuteurée sous serre. Nous proposons donc l'utilisation de ces deux formules en fonction du niveau du Rgs, en attendant la mise au point d'une formule plus adaptée aux conditions du Sud et du Centre.

Pour connaître la valeur de l'ETPs en mm ou en l/m² il y a lieu d'utiliser les formules sous la forme suivante :

ETPs = 0,46 Rgs/58,6

ETPs = 0,62 Rgs/58,6 - 0,8

4. Facteur de rationnement

Le taux de rationnement que l'on peut utiliser sous serre dépend du type de goutteur ou d'irrigation localisée utilisée et du nombre de goutteurs installés (densité). Sous serre avec des goutteurs classiques on peut utiliser un taux de rationnement de 0,75 pour pastèque, de 0,8 pour melon et de 0,85 pour tomate. Pour l'irrigation le taux de rationnement est de 0,9. Pour des raisons déjà mentionnées nous ne recommandons pas l'utilisation du rationnement.

5. Les coefficients cultureux

Les besoins en eau des cultures dépendent non seulement du climat mais aussi du stade de développement et du degré d'occupation de la serre. Ci-dessous nous donnons les coefficients cultureux pour les cultures maraîchères les plus importantes.

Tomate

- du semis au début de la floraison.....0,5
- floraison 1° bouquet à la floraison 2° bouquet..... 0,65
- floraison 2° bouquet à la floraison 4° bouquet.....0,8
- floraison 4° bouquet au début de la récolte.....1,1
- début de la récolte à la mi-récolte.....1,0
- de la mi-récolte à la fin de la récolte.....0,9

Piment

- de la plantation à la floraison de la 1° fleur..... 0,5
- de la floraison de la 1° fleur à début récolte..... 0,8
- récolte..... 1,0
- vers la fin de la culture..... 0,9

Aubergine

- de la plantation à la floraison de la 1° fleur..... 0,5
- floraison 1° fleur à début récolte..... 0,8

- récolte.....	0,9
- vers la fin de la culture.....	0,8

Melon

- semis ou plantation à floraison mâle.....	0,4
- floraison mâle à floraison femelle.....	0,5
- floraison femelle au stade grossissement.....	0,8
- grossissement au début de la récolte.....	1,0
- récolte.....	0,8

Concombre lisse

- semis ou plantation jusqu'à floraison femelle....	0,6
- floraison femelle jusqu'à début récolte.....	0,6-0,9
- récolte.....	0,9

6. Conduite de l'irrigation à partir d'un petit lysimètre

Un autre moyen de connaître les besoins en eau des cultures est l'installation d'un petit lysimètre à l'intérieur de la serre occupant une dizaine de plants (2 rangs de 5 plants) avec une surface minimale de 2m². Ce lysimètre aura une profondeur d'environ 50 cm et aura une inclinaison de 10 cm vers un coin, facilitant l'évacuation des eaux de drainage par une sucette. Il s'agit d'un lysimètre réalisé par une double bâche plastique PE longue durée utilisée normalement pour la couverture de la serre. Cette bâche est posée sur un lit de sable fin de 5 à 10 cm d'épaisseur pour éviter toute perforation. Une fois la bâche posée dans le trou on le remplit avec une couche mince de sable fin et puis une couche de gravier fin pour faciliter le drainage. Sur ces couches de drainage on dispose le sol de culture en le tassant convenablement. Cette couche a une épaisseur de 45 cm. La sucette est liée avec un tube à la fosse de drainage (tuyau en béton de 300 à 400 mm de diamètre et de 1m de long) à moyen d'un tube en PVC 63, dans lequel on pose un seau pour recueillir les eaux de drainage. L'irrigation sera conduite alors de telle façon que la quantité drainée sera de l'ordre de 10% de la quantité d'eau distribuée. La quantité d'eau distribuée peut se calculer par le débit fois le nombre de goutteurs fois la durée d'irrigation si on utilise l'irrigation goutte à goutte classique. Pour l'Irrigaine on multiple le débit horaire linéaire avec le nombre de mètres de gaine et avec le

temps. Le débit horaire de l'Irrigaine est de 5 litres par m pour 2mCE et de 4 litres par m pour 1,5mCE.

LA FERTILISATION EN IRRIGATION LOCALISEE *

1. Introduction

L'apport des engrais selon les exportations de la culture est un premier pas vers l'obtention de bons rendements, à condition que les apports sont organisés de telle façon que l'on évite des pertes importantes. En effet le complément de la fumure de fond (fumier, phosphore et une partie de la potasse) par l'apport de quantités importantes d'engrais chimiques (les besoins totaux d'une culture en azote 3 à 4 apports sous forme d'ammonitre ou de nitrate de potasse et en potasse par 2 à 3 apports sous forme de sulfate ou nitrate de potasse) résulte, peu importe le type d'irrigation employé, mais surtout en sol léger, dans un lessivage très important de l'azote. Pour la potasse on assiste également à des mouvements assez importants. En effet il n'est pas rare de constater sur les cultures des feuilles jaunâtres (carence en azote) avec des nécroses marginales (carence en potasse) et ceci malgré des apports importants dans la matière.

En irrigation classique (à la rigole) sur sol léger on a un tel lessivage que l'on devrait distribuer les engrais pratiquement une irrigation sur deux, ce qui conduit donc à fractionner les apports. L'application du principe de fractionnement des apports azotés et potassiques, résultera sous ce régime d'irrigation, à une nette amélioration des résultats. Quoique ce fractionnement permette une nette amélioration, il est néanmoins difficile à réaliser correctement, car il est évident que des apports de 3 à 4 kg d'ammonitre chaque 10 jours sur une serre contenant 1.500 à 2.000 plants de tomate équivaut à une distribution par plante de 2 g d'ammonitre par plante. La répétition tous les 10 jours de cet épandage localisé et fractionné, est une seconde contrainte physique à la réalisation, sans parler de la précision lors de l'exécution de ce travail. L'utilisation de doses excessives risquent de provoquer des brûlures catastrophiques, surtout sur sol léger à faible CEC (Capacité d'Echange Cationique). Il faut donc trouver un moyen pour distribuer plus ou moins

* 21^{ème} Séminaire National de formation dans le cadre du Projet Geothermie PNUD/TUN /85/004 Gafsa 14 Novembre 1988.

fiablement et homogènement ces quantités faibles d'engrais.

En irrigation localisée avec une fertilisation classique on assiste aussi à une migration des engrais apportés à l'avance, et au fur et à mesure les éléments fertilisants migrent en dehors de la zone racinaire. Le lessivage est néanmoins beaucoup plus lent et beaucoup moins important que sous régime d'irrigation classique. L'utilisation de l'irrigation localisée selon les besoins de la culture constitue donc déjà une amélioration importante.

Par contre par l'utilisation d'une irrigation fertilisante on maintient une concentration en sels fertilisants assez élevée et assez constante dans les zones racinaires, et les plantes y trouvent donc une bonne fertilisation en continu. Cette approche de la fertilisation par l'irrigation doit en outre permettre de distribuer au fur et à mesure, et selon les besoins, les fertilisants nécessaires pour assurer le bon développement de la culture.

2. Méthodes d'irrigation fertilisante

L'irrigation fertilisante peut se faire avec des solutions complètement ou partiellement équilibrées ou des solutions non équilibrées. Les solutions équilibrées sont calculées à partir de la composition des végétaux et permettent donc d'assurer une absorption équilibrée des éléments fertilisants.

Plusieurs types de solutions fertilisantes équilibrées existent, mais en culture légumière sous serre on utilise en général la solution pour plantes neutrophiles de Coïc-Lessaint à 14,4 meq/litre dont l'exemple est présenté ci-dessous.

Elément	meq	mg/me	mg/litre
NO ₃ ⁻	12,2	62	14 (N)
NH ₄ ⁺	2,2	18	14 (N)
HPO ₄ ⁻	2,2	97	71 (P ₂ O ₅)
K ⁺	5,2	39	47 (K ₂ O)
Ca ⁺⁺	6,2	20	28 (CaO)
Mg ⁺⁺	1,5-3	12	20 (MgO)
SO ₄ ⁻⁻	1,5	48	16 (S)

Pour le NO₃⁻, le NH₄⁺ et le HPO₄⁻ les normes sont constantes. Par contre pour

le Ca^{++} , le Mg^{++} et le K^+ on peut admettre des fluctuations autour des normes à condition de ne pas s'écarter trop des relations proportionnelles exprimées en meq. Avec une concentration faible en Mg^{++} on doit respecter l'équilibre suivant : 47,6% Ca + 12,8% Mg + 39,6% K = 100%. Avec une concentration élevée en Mg^{++} on doit respecter l'équilibre suivant: 36,1% Ca + 20,8% Mg + 36,1% K = 100%.

Dans certains cas et surtout pour les cultures très jeunes ou en fin de culture on utilise des solutions à 10 ou 12 meq/l. Dans certains autres cas et surtout pour des cultures en pleine production on utilise des solutions jusqu'à 18 meq/l.

Dès que le taux naturel en Ca et Mg de l'eau dépasse de 50% les normes de la solution équilibrée, l'équilibrage résultera dans des eaux à salinité trop élevée et donc nocives pour les cultures. Deux possibilités existent dans ce cas :

- * l'équilibrage partiel de la solution nutritive en N, P et K seulement, ce qui améliore déjà les résultats par rapport à la fertilisation classique. On réalise cet équilibrage partiel en NPK en ne tenant pas compte de la teneur initiale de l'eau. Il convient alors d'ajouter à l'eau les quantités de fertilisants pour atteindre les concentrations suivantes : 2,2 meq/l HPO_4^- , 2,2 meq/l de NH_4^+ , 12,2 meq/l de NO_3^- et 5,2 meq/l de K^+ . Dans ce cas une légère augmentation de la teneur en K^+ est sans inconvénient et même conseillée si les eaux sont riches en Ca et Mg.

- * la déminéralisation d'une quantité d'eau permettant d'obtenir après mélange avec l'eau initiale des teneurs acceptables et permettant de réaliser l'équilibrage. La quantité d'eau à déminéraliser dépend largement de la salinité totale, mais pour la plupart des forages surtout de la teneur en CaO et en MgO, car après mélange il faudrait obtenir des concentrations comprise entre 5 et 7,5 meq/l pour le Ca^{++} (soit à peu près 140 à 210 mg/l de CaO) et entre 1,5 et 4,5 meq/l pour le Mg^{++} (soit à peu près 30 à 90 mg/l de MgO). La proportion de l'eau non traitée à mélanger avec de l'eau déminéralisée est obtenue en divisant la teneur souhaitée pour l'élément concerné par la teneur initiale. Par exemple pour une eau contenant 300 mg/l de CaO et 90 mg/l de MgO que l'on veut modifier à 160 mg/l de CaO et 50 mg/l de MgO, il faut mélanger respectivement 53,3% (160/300) et 55,6% (50/90) d'eau non traitée avec 46,7% et 44,4% d'eau déminéralisée.

L'application la plus simple est l'incorporation dans les eaux d'irrigation des sels minéraux (= fertilisants) en solution non équilibrée, selon une cadence

régulière et en fonction des besoins calculés de la culture. En principe on doit apporter les engrais tous les 2 jours, soit 3 fois par semaine. Dans ce cas on peut procéder de la même façon que pour la méthode de calcul proposée dans la fiche de fertilisation, mais en utilisant alors 15 apports fertilisants par mois, ce qui permet de calculer les quantités à distribuer par serre lors de chaque irrigation fertilisante.

3. Choix de la méthode d'irrigation fertilisante

La méthode à adopter dépend du type et des conditions de culture :

- * en culture sur substrat avec une très faible CEC (2 à 5 meq/l) il est absolument nécessaire d'adopter la solution complètement équilibrée, avec en plus dans certains cas des modifications en fonction du climat et de l'état végétatif. Ceci est par exemple très important pour la culture de tomate à croissance déterminée, alors que le concombre et la tomate à croissance indéterminée sont beaucoup moins sensible à ce niveau.

- * en culture sur substrat avec une faible (30 meq/l) ou moyenne (60 meq/l) CEC (Capacité d'Echange Cationique) on peut adopter durant la 1ère année la solution partiellement équilibrée et si le volume du substrat est relativement important même durant la 2ème année, mais ultérieurement on doit tenir compte de l'épuisement du substrat et utiliser la solution complètement équilibrée. En culture sur substrat il est conseillé de ne pas descendre en dessous de 20 litres de substrat par plante surtout au début, sachant que la plante cultivée dans le sol exploite environ 100 litres de substrat. La diminution du volume doit se faire au fur et à mesure que l'on domine cette technologie de culture sur substrat.

- * en culture sur sol léger on peut utiliser soit la solution partiellement équilibrée, soit la fertilisation selon les exportations.

La conduite de la fertilisation en solution équilibrée est la plus parfaite et la plus performante, mais dans le cas des eaux chargées du Sud elle est relativement difficile à suivre et coûteuse. La solution partiellement équilibrée est la plus simple à conduire pour l'agriculteur et même plus simple que la conduite selon les exportations.

Dans les 3 cas il suffit de disposer d'un appareil d'injection de la solution fertilisante dans le réseau d'irrigation selon une cadence et une dilution telle que

l'on atteint la concentration des engrais nécessaires pour la plante, avec une bonne homogénéité de distribution.

4. L'injection des fertilisants

L'injection des engrais peut se faire par une pompe doseuse, par un doseur-distributeur ou par un dilueur hydraulique. L'achat d'un doseur-distributeur d'engrais ou d'une pompe doseuse est à conseiller dans le cas où on utilise un système d'irrigation localisée classique (fonctionnant entre 1 et 2 bars). L'utilisation d'une pompe doseuse permet de rester en concentration stable puisqu'elle assure une injection d'une petite quantité de solution-mère à des intervalles réguliers. Le prix d'achat d'une pompe doseuse est de l'ordre de 300 DT et il en faut une par bac de mélange utilisée. En solution équilibrée on utilise en général deux bacs, notamment un bac contenant des engrais à base de N, P, K, Mg ainsi que des oligoéléments, mais jamais de calcium. Dans le 2ème bac on met en général des nitrates (en outre le nitrate de calcium) et les chélates de fer.

L'utilisation d'un doseur-distributeur fonctionnant en bypass sur la conduite d'irrigation permet d'injecter en continu une quantité de la solution-mère, correspondant à la quantité d'eau bypassée. Ceci entraîne néanmoins une diminution de la concentration de la solution-mère et donc de la solution fertilisante. Le prix d'achat d'un distributeur-doseur est de l'ordre de 400-500 DT et il joue en même temps le rôle du récipient-mère. Ce système n'est qu'utilisable pour l'injection d'engrais en fonction des besoins ou pour la solution partiellement équilibrée.

Par contre en utilisant des systèmes d'irrigation fonctionnant à basse pression (Irrigaine, T-Tape, ...) en outre sur bassin surélevé légèrement (2m CE) on peut injecter les engrais à partir d'un dilueur hydraulique, facile à réaliser à moyen d'un fût, d'un seau ou tout autre récipient positionné ou suspendu de telle façon que l'on peut assurer une surpression de 0,5 m par rapport à la pression assurée par le bassin. Ceci permet alors de réaliser le débit d'injection voulu par un opercule calculé avec une perte de charge de 0,3 m environ. Pour réaliser l'injection de la solution fertilisante on a besoin du fût ou du récipient sus-mentionné avec un robinet d'arrêt, relié par un tuyau souple et non transparent à un collier de prise en

charge, placé sur le tuyau d'amenée de l'eau d'irrigation vers la serre. L'opercule de régulation est effectué sur le tuyau d'amenée au niveau du collier de prise en charge. Ci-dessous on trouve la dimension des opercules pour des pertes de charge et des débits d'injection différents.

Débit d'injection	Diamètre de l'opercule pour perte de charge		
	0,3 m	0,4 m	0,5 m
l/h			
20	1,76 mm	1,67 mm	1,55 mm
25	2,1	1,9	1,79
40	2,68	2,45	2,37
50	2,97	2,76	2,61
100	4,24	3,95	3,74
200	6,00	5,59	5,29
250	7,72	7,18	6,78

Afin d'obtenir un fonctionnement homogène il y a intérêt à adapter le fût au bassin ou à la réserve d'eau afin de maintenir une différence de hauteur entre les deux niveaux d'eau aussi stable que possible durant le fonctionnement. Pour ces raisons il est conseillé dans la plupart des cas de disposer le fût à plat sur le bassin.

Les dimensions idéales du dilueur dépendent de la relation entre le débit d'injection et le débit d'irrigation, donc du taux de dilution. Si ce taux est connu et fixé on peut obtenir la dimension parfaite du dilueur en divisant la surface de la base du bassin par le taux de dilution, à condition que le débit d'eau d'irrigation est relativement stable, donc que la colonne d'eau est relativement peu variable ; ceci impose donc l'utilisation de bassin peu haut et à grande surface de base. Pour un bassin de 80 m^3 avec les dimensions suivantes : $8 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 1,7 \text{ m}$, le dilueur hydraulique doit avoir une surface de base de $48/50 = 1 \text{ m}^2$, si le taux de dilution est de 50.

L'injection des fertilisants peut se faire avec un dilueur individuel dans chaque serre ou avec un dilueur collectif pour un groupe de serres. Dans le cas d'utilisation d'un dilueur collectif on peut irriguer et fertiliser plusieurs serres à la fois, si le réseau d'irrigation a été calculé dans ce sens et permet une alimentation équilibrée entre les serres. A ce moment on utilisera des débits d'injection élevés

entraînant des opercules d'injection de dimension relativement importante (par exemple 100 l/h pour 2 serres et 250 l/h pour 5 serres ensemble). Dans le cas d'utilisation d'un dilueur individuel par serre on prend un récipient de contenu limité (10 à 20 litres) pour l'injection des engrais dans le circuit d'irrigation. Il convient alors de mettre à chaque irrigation fertilisante la quantité d'engrais à injecter dans le récipient. Dans le cas d'un seau de 10 litres un opercule de 3 mm assure une durée d'injection de 12 minutes et un opercule de 2 mm assure une durée d'injection de 25 minutes pour une perte de charge de 0,3 m. Pour un récipient de 20 litres la durée d'injection sera respectivement de 45 minutes et de 20 minutes pour des opercules de 2,2 et de 3,3 mm.

Dans le cas de l'utilisation du dilueur hydraulique pour les solutions partiellement équilibrées, la concentration de la solution n'est jamais modifiée sauf cas exceptionnel. L'utilisation d'un dilueur hydraulique pour la solution équilibrée n'est pas envisagée pour le moment. Dans le cas de l'utilisation du dilueur pour l'injection des fertilisants en fonction des exportations de la culture, ils existent deux possibilités, notamment l'utilisation de solutions à concentration variable ou de solutions à concentration constante.

Dans le premier cas on adaptera la concentration dans le dilueur en fonction des besoins en eau, alors que dans le deuxième cas on utilisera une durée d'injection variable en fonction de la quantité d'engrais à injecter.

5. Utilisation de solutions à concentrations variables

En cas de cultures homogènes (même culture et même date de semis) les quantités d'eau changent en fonction du développement des cultures et de l'évolution du rayonnement global. La durée d'irrigation sera donc adaptée au fur et à mesure ainsi que la quantité d'engrais à diluer dans le dilueur (et ceci en fonction de la durée d'irrigation), afin d'arriver à distribuer lors de chaque irrigation fertilisante la quantité voulue d'engrais. Pour réaliser ceci on doit connaître la durée d'utilisation possible d'un dilueur plein et la durée de l'irrigation de la serre.

La durée d'utilisation du fût s'obtient par la division du contenu du fût (ex. 200 litres) par son débit horaire comme dilueur (ex. 50 l/h), ce qui nous donne la

durée d'utilisation de 4 heures (= 200 l : 50 l/h). La durée de l'irrigation s'obtient par la division des besoins en eau de la serre (ETPs en mm ou l/m² multiplié par la surface en m²) par le débit horaire du système d'irrigation utilisé. Si l'ETPs est de 3,2 mm avec un coefficient cultural de 1, les besoins en eau pour une serre de 500 m² sont de 3,2 l/m² x 500 m² = 1.600 litres et la durée d'irrigation pour un système à débit horaire de 2.500 l/h sera de 1600/2500 = 0,64 heures (38,5 minutes).

La quantité d'engrais à mettre dans un dilueur plein est alors déterminée par la quantité d'engrais à distribuer lors de chaque irrigation fertilisante, multipliée par la durée d'utilisation du fût et divisé par la durée d'irrigation de la serre. Si on veut distribuer 0,9 kg d'ammonitrite par serre chaque 3 jours en utilisant un dilueur de 200 litres avec un débit horaire de 50 litres/h et sous un régime d'irrigation de 1600 l/jour, soit une durée d'irrigation de 0,64 heures sur un réseau débitant 2500 l/h, on doit mettre dans le fût dilueur rempli de 200 litres d'eau une quantité d'engrais correspondant au nombre de serres que le fût plein peut fertiliser sous la cadence d'irrigation de 1600 l/jour, soit $4/0,68 = 6,25$. La quantité d'engrais à mettre dans le fût est de $6,25 \times 0,9 = 5,625$ kg. Dans ce cas chaque irrigation de 0,64 heures correspond à une injection de 16% (0,64/4) de la totalité des engrais soit $5,625 \times 0,16 = 0,9$ kg.

Dans le cas d'utilisation de solution équilibrée la concentration de la solution fertilisante peut changer parfois pour tenir compte de cas spéciaux :

- temps couvert et pluvieux : augmenter la concentration globale
- plants vigoureux avec peu de fruits augmenter Ca et Mg et diminuer K
- plantes très chargées en fruits : augmenter K
- irrigation avec beaucoup de drainage : augmenter Ca et Mg, surtout en été
- tomate à croissance déterminée : augmenter au fur et à mesure K, tout en diminuant légèrement Ca et Mg, avec N et P stable. Néanmoins sur substrat avec une CEC relativement élevée on procède à peu de changements car il y a l'effet tampon du substrat, mais si la CEC est faible on doit intervenir plus souvent.

6. Utilisation de solutions à concentration constants

L'utilisation de concentrations constantes nécessite le calcul de la durée de l'utilisation du dilueur pour l'injection de la quantité d'engrais nécessaire. Par exemple l'utilisation de 8 ou 10 kg d'ammonitrite par fût de 200 litres correspond à

une distribution de 2 ou 2,5 kg d'ammonitre par heure si le débit horaire du dilueur est de 50 litres par heure. Si on veut distribuer 0,9 kg d'ammonitre chaque 3 jours par l'irrigation fertilisante, il conviendra donc de faire fonctionner le dilueur durant respectivement 0,45 heures (0,9 kg/ 2 kg/h ou 0,38 heures (0,9 kg/ 2,5 kg/h).

7. La solubilité et le choix des engrais

La solubilité dans l'eau de la plupart des engrais de commerce est assez importante à 20°C et permet de réaliser l'irrigation fertilisante, par injection simple, sans aucun problème. Les quantités d'engrais solubles dans 100 litres d'eau sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Type d'engrais	Solubilité en			
	kg de produit	en unités		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Nitrate de chaux	122	18,3		
Nitrate de potasse	31,6	4		13,6
Nitrate de magnésie	27,9	0		
Sulfate d'ammoniaque	73	14,6		
Urée	103,3	46,4		
Ammonitre 33%	192	64,4		
Phosphate d'ammoniaque	66,1	11,8	31,7	
Sulfate de potasse	11			5,3
Phosphate monopotassique	23		11,9	7,8

Il est néanmoins conseillé de ne pas utiliser des engrais sulfatés pour les eaux déjà riches en sulfates. On peut mélanger dans le fût dilueur sans inconvénient du nitrate de potasse et de l'ammonitre. L'adjonction d'engrais phosphatés nécessite l'acidification et pour ceci nous pouvons utiliser de l'acide nitrique et même l'acide phosphorique. La disponibilité des éléments fertilisants dépend essentiellement du pH. Ci-joint un schéma sur la disponibilité de la plupart des éléments en fonction du pH du sol. Il apparaît de ce schéma que la plupart des éléments sont assez disponible pour des pH entre 6 et 6,5.

En irrigation fertilisante selon les exportations nous conseillons pour le moment encore de distribuer les engrais phosphoriques en fumure de fond ainsi qu'une partie des engrais potassiques. Pour les oligo-éléments nous suggérons de faire quelques applications foliaires avec un engrais multiminéral en cours de

culture.

L'irrigation fertilisante en solution partiellement équilibrée est possible à partir du dilueur hydraulique en apportant l'azote et le potasse par nitrate de potasse et ammonitre, alors que le phosphore est apporté sous forme d'acide phosphorique 53%. Cette solution est à réaliser par l'injection de 180 ml d'acide phosphorique 53%, 530 g de nitrate de potasse et 1100 g d'ammonitre par m³ d'eau, ce qui correspond à une teneur de 2,2 meq H₂PO₄⁻, de 5,2 meq de K⁺, de 4,6 meq de NO₃⁻ et de 9,8 meq de NH₄⁺.

7. Le colmatage

Les problèmes de colmatage des systèmes d'irrigation localisée ont deux origines :

- le bouchage par formation d'algues
- l'entartrage par précipitation de calcaire et de phosphate tricalcique.

Les systèmes d'irrigation localisée se bouchent facilement par les algues en Tunisie. Les algues se forment aussi bien au niveau du bassin qu'au niveau des goutteurs ou des Irrigaines. Afin d'éviter ces problèmes au niveau des bassins on devrait les couvrir avec un film agricole noir, dopé avec suffisamment de noir de carbone (minimum 3%) pour devenir opaque à la lumière et en évitant ainsi la photoactivation des algues.

Avant la couverture du bassin on procède à un traitement avec 30 litres de javel 27° chlorométrique (soit 66 litres à 12° chlorométrique) par 80 m³ de volume d'eau en mélange avec 0,5 à 1 kg d'un fongicide cuprique (Cuprosan, Cuprinèbe) ou du sulfate du cuivre. Le mélange javel/cuivre est particulièrement actif contre les algues. Ultérieurement on pourra éviter la formation des algues au niveau des goutteurs ou des gaines par une injection régulière (chaque 7, 10 ou 15 jours suivant le cas) de javel à partir du dilueur et ceci à raison de 750 cc (27°) ou 1650 cc (12°) pour un fût dilueur de 200 litres débitant 50 litres par heure. De temps à autre on peut adjoindre un peu de cuivre (60 g de cuprosan ou de cuprinèbe par fût dilueur). L'ouverture des conduites d'irrigation rampe par rampe à la fin du traitement est nécessaire et permet de chasser les algues mortes, ayant lâchées les parois.

Le traitement et la couverture du bassin éviteront le développement et le

bouchage interne du système d'irrigation. Le traitement par injection de javel permettrait de maîtriser le développement au niveau de la sortie des gouteurs.

L'entartrage chimique calcaire peut être réduit par acidification en utilisant des acides forts (acide nitrique, acide phosphorique, acide chlorhydrique ou acide sulfurique) car à un pH de 6,5 il n'y a plus de précipitations pour des teneurs de 20 à 30 meq de Ca⁺⁺. Les risques de colmatage dus à des précipitations de phosphate tricalcique sont très importants avec toutes les sources de fertilisation phosphorique comme présenté dans le tableau ci-dessous.

Source	ration H ⁺ /PO ₄ ⁻⁻⁻	indice de précipitation
DAP	1/1	100 % des cas
MAP + DAP	1,5/1	100% des cas
MAP	2/1	75% des cas
H ₃ PO ₄ (52-72%)	3/1	15% des cas
relation optimale	4/1	0% des cas

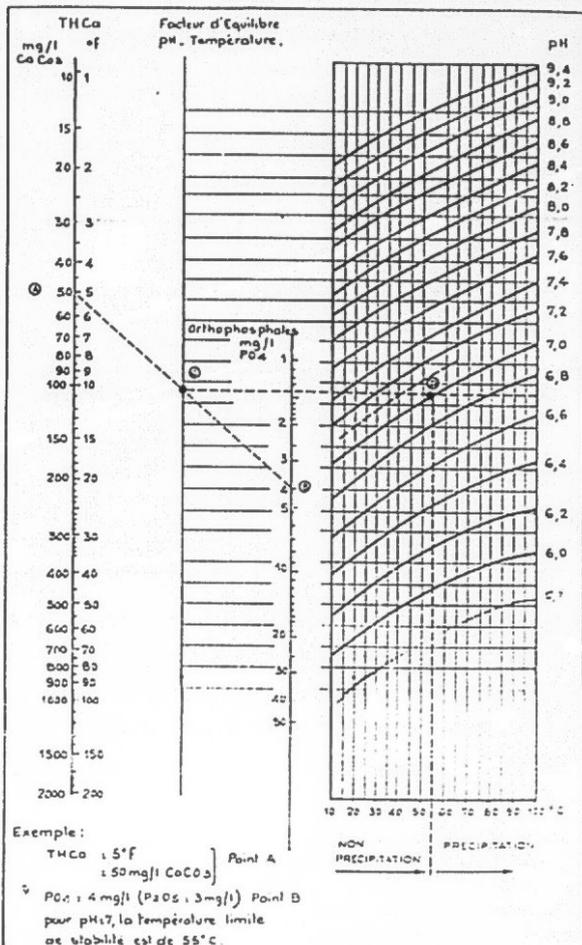
Les risques de précipitation deviennent donc faible avec l'utilisation de l'acide phosphorique comme source d'engrais phosphorique (15% des cas seulement) et si la précipitation se produit on peut y remédier en modifiant la relation H⁺/PO₄⁻⁻⁻ de 3/1 vers 4/1 en ajoutant un supplément d'acide non phosphorique. Le tableau ci-dessous nous donne la teneur en ion H⁺ pour les différents acides sur la base de 100%.

Type d'acide	ration H ⁺ /unité	remarque
Acide chlorhydrique	1/33	dangereux, corrosif
Acide sulfurique	1/49	dangereux, corrosif, bon marché
Acide nitrique	1/63	dangereux, corrosif
Acide sulfurique avec adjonction d'urée	1/87	faiblement corrosif et moins dangereux

Pour remonter la relation H⁺/PO₄⁻⁻⁻ vers 4/1 il faut donc utiliser par exemple 49 µl d'acide sulfurique par litre d'eau, soit 49 ml par m³ d'eau à base 100%.

La stabilité du phosphate tricalcique en fonction de la teneur CaCO₃ de l'eau et de la teneur en PO₄ ou en P₂O₅ dépend de la température et du pH. L'abaque ci-joint permet de cerner ce problème.

2.2. STABILITÉ DU PHOSPHATE TRICALCIQUE



Valeur du pH									
4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	
AZOTE									
PHOSPHORE									
POTASSIUM									
SOUFRE									
CALCIUM									
MAGNESIUM									
FER									
MANGANESE									
CUIVRE									

ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTS SYSTEMES D'IRRIGATION LOCALISEE ET GOUTTE A GOUTTE *

1. Introduction

L'utilisation de l'irrigation localisée (mouillant une zone en continue tout le long de la gaine) ou du goutte à goutte a permis de mieux maîtriser les apports d'eau qu'avec un système d'irrigation classique à la raie.

En plus ces systèmes permettent de réaliser une économie sensible par rapport à l'irrigation classique. Un exemple très simple obtenu dans la région de Gafsa (au niveau de la parcelle de démonstration de Sidi Bou Baker) permet de mieux situer cette économie en eau :

* En irrigation classique on irrigue en hiver une fois par semaine avec un débit de 25 l/sec et la durée d'irrigation de la serre est de 1 heure. Au printemps on irrigue deux fois par semaine avec chaque fois 1 heure d'irrigation à raison de 25 l/sec. Ceci correspond donc à 90 m³ par semaine en hiver et 180 m³ par semaine au printemps, soit respectivement 12,8 et 25,6 m³ par jour et par serre.

* En irrigation avec l'Irrigaine on peut se contenter de distribuer par serre 650 l par jour et par serre en janvier-février, ce qui représente seulement 5% de l'apport faite sous régime d'irrigation classique. Durant la période mai-juin on peut se contenter de donner environ 2000 l par serre, ce qui représente seulement 8% de l'apport faite par l'irrigation classique.

Un autre avantage de l'irrigation localisée est la possibilité de distribuer d'engrais en petites quantités, au jour le jour. Ceci permet donc un meilleur approvisionnement des plantes et par conséquent des rendements plus élevés et de qualité meilleure.

* 6ème séminaire National dans le cadre du Projet Goethermie PNUD/TUN /85/004 formation de Gabès,
10 Juillet 1989.

L'utilisation de l'arrosage localisé permet également de libérer la main d'œuvre pour d'autres travaux.

L'homogénéité de la distribution de l'eau dans la serre est un facteur très discuté et ci-dessous nous présentons les résultats de nos observations sur 3 matériaux différents sur 3 sites. Les matériaux comparés sont le goutteur Gana, la gaine Turbo-Tape et l'Irrigaine. Ces observations ont été faites sur les Stations de Zerkine, de Tozeur et de Gafsa. Le système à goutteur incorporé a été jugé moins intéressant car plus difficile à décolmater.

2. Résultats

2.1. Goutteur Gana

Les observations faites sur les stations de Zerkine et de Tozeur sur 9 goutteurs pris au hasard sur toute la longueur d'une rampe d'irrigation de 60 m sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les débits ont été mesurés sur des goutteurs ayant subi une action de déblocage au préalable.

goutteur n°	Zerkine (1,4 bar) en l/h	Tozeur (2 bar) en l/h
1	1.8	5.38
2	11.4	4.08
3	22	3.42
4	3.6	7.02
5	2	6.96
6	12.4	4.5
7	2.5	10.26
8	1.9	3.84
9	0.25	3.12
moyenne	6.43	5.39
écart-type	6.88	2.18
% de déviation	196	107

La variabilité dans les débits est très élevée dans les deux cas. Pourtant les goutteurs sont installés respectivement 1 et 2 ans seulement.

2.2. Turbo-Tape

Les résultats de nos observations sur le Turbo-Tape sont présentés dans le tableau ci-dessous. A Gafsa la gaine Turbo-Tape est alimentée à partir d'un bassin surélevé et la pression se situe donc entre 1 et 2 mCE. A Zerkine la pression utilisée est de 1,4 bar comme pour le goutte à goutte.

goutteur n°	Débit en ml/h		
	Gafsa 1,1 mCE	Gafsa 1,4 mCE	Zerkine 1,4 bar
1	187,5	295,7	750
2	127,5	257,1	750
3	285	102,9	732
4	225	222,9	660
5	240	231,4	684
6	270	124,3	750
7			708
8			750
9			600
moyenne	222	206	709
écart-type	52,3	69,4	49,6
% de hétérogénéité	72	97	6

La gaine Turbo-Tape présente donc relativement une bonne homogénéité, nettement meilleure que celle obtenue avec les goutteurs Gana.

2.3. Irrigaine

Les mesures sur des Irrigaines ont été réalisées avec des tubes enmanchant un mètre de gaine, ce qui permet de récupérer le débit d'un mètre de gaine.

A la Station de Zerkine les débits ont varié sur des gaines non nettoyées de 5 à 16 l/h par mètre linéaire, pour une pression de 2 mCE. A la Station de Gafsa les débits sur des gaines ont été mesurés avant et après nettoyage partiel ou total de la gaine.

Les mesures ont été prises au début, au milieu et à la fin d'une gaine. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Débit en litre par heure et par mètre			
Endroit de la gaine	Avant nettoyage de la gaine	Nettoyage de la gaine	
		partiel (1m)	total
début	20,7	31,1	18,9
milieu	5,4	36	14,7
fin	3,6	38	22,8
moyenne	9,9	35,03	18,8
écart-type	7,7	2,9	3,3

Le débit de l'Irrigaine non nettoyée est très irrégulier, mais une fois nettoyée son débit devient relativement régulier. Notons que le débit diminue après nettoyage d'une gaine et il diminuera encore si toutes les gaines de la serre seront nettoyées, contribuant ainsi à diminuer l'hétérogénéité.

2.4. Conclusion

Il apparaît donc que le Turbo-Tape donne les débits les plus homogènes, alors que le goutteur Gana donne les moins bons résultats.

3. Prix

Si nous considérons que pour les 3 systèmes on utilise les mêmes investissements au niveau de l'alimentation et des peignes de distribution et en considérant que pour obtenir une humectation en ligne il faut 5 goutteurs par mètre linéaire, le coût au mètre de chaque système d'irrigation serait de :

Irrigaine : 90 millimes

Turbo-Tape : 120 millimes

Goutteur Gana : (1 m de rampe + 5 goutteurs) : 1100 millimes.

Il faut donc amortir le goutteur Gana sur une dizaine d'années pour devenir concurrentiel. La différence du prix entre le Turbo-Tape et l'Irrigaine est relativement faible.

4. La robustesse du matériel

Les gaines sont nettement plus sensibles à la détérioration mécanique que le système Gana, car ils sont en film plastique. La gaine Turbo-Tape est fabriquée à partir de PEmd, ce qui confère une meilleure résistance mécanique que les Irrigaines en PEbd.

5. Obstruction

Les gaines sont relativement sensible par un colmatage partiel par des algues, surtout si le bassin n'est pas bien traité ou protégé. Les goutteurs Gana se bouchent très facilement, mais sont facile à nettoyer.

6. Conclusion

Les meilleur choix au niveau de ces 3 matériaux sont les gaines, qui permettent un fonctionnement à faible pression, et dont le prix d'achat est faible. La meilleure répartition sous serre est obtenue avec la gaine Turbo-Tape.

LES ELEMENTS NUTRITIFS DANS LA PLANTE

1ère PARTIE :

LES MACROELEMENTS *

1. Introduction

Les plantes sont constituées de plusieurs types de produits chimiques, très complexes en général. Pour la formation de ces produits chimiques, la plante a besoin à part du carbone (C), de l'hydrogène (H) et de l'oxygène (O), de 12 autres éléments nutritifs. Les 12 éléments peuvent se classer en deux groupes, notamment les macro-éléments (éléments majeurs), formant plus de 99% du poids des plantes, et les micro-éléments (oligo-éléments) :

macro-éléments		micro-éléments	
nom	symbole	nom	symbole
azote	N	bore	B
phosphore	P	cuivre	Cu
potassium	K	manganèse	Mn
calcium	Ca	molybdène	Mo
magnésium	Mg	fer	Fe
soufre	S	zinc	Zn

On appelle ces 12 éléments aussi des éléments essentiels, parce qu'ils sont nécessaire pour la croissance des plantes. Cependant la plante ne consiste pas seulement des éléments essentiels.

* 8ème séminaire National de formation dans le cadre du Projet Geothermie PNUD/TUN /85/004
Kébili, 23 et 24 Janvier 1990.

Il y en a des éléments qui sont absorbés parfois "par hasard" et qui, en faible concentration, n'influencent pas la croissance et le développement de la plante (par exemple l'absorption du Cadmium par la laitue et du Chlore par l'asperge). Il y en a aussi des éléments qui sont utiles pour certains végétaux seulement comme par exemple le Natrium pour les betteraves et Silicium pour le blé.

Certains chercheurs croient qu'il y a plus que 12 éléments essentiels. Les quantités de ces autres éléments nécessaires pour la plante sont cependant si minime, que presque indéterminable, même avec de l'appareture la plus sophistiquée. Ceci nous amène à la notion de "quantité". Un chercheur Américain a classé les éléments en fonction de la présence relative de leurs atomes dans la plante et ceci en comparaison avec le Molybdène.

éléments	nombre d'atomes
Molybdène	1
Cuivre	100
Zinc	300
Manganèse	1000
Fer	2000
Bore	2000
Soufre	30000
Phosphore	60000
Magnesium	80000
Calcium	125000
Potasse	250000
Azote	1000000

On sait que la plante puise le carbone sous forme de gaz carbonique (CO_2) dans l'air, l'hydrogène et l'oxygène à partir de l'eau du sol, et les autres éléments sous forme d'ions qui se trouvent dans la solution du sol ou du substrat, ou encore dans la solution nutritive. Non seulement les racines sont capables d'absorber des éléments nutritifs, mais les feuilles possèdent également la capacité d'absorption, dont on se sert parfois en utilisant des engrais foliaires (comme p.e. Actigil, Wuxal, Stimufol...).

2. Les macro-éléments

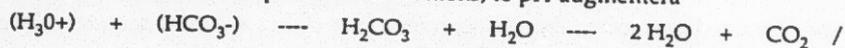
Dans ce chapitre les 6 macro-éléments seront traités l'un après l'autre, en mettant l'accent sur : leurs formes de présence et leur dynamisme dans le sol, leur rôle dans la plante, leur forme d'absorption, leur influence sur le pH et la salinité ainsi que sur les autres éléments (antagonisme) ; enfin les symptômes et causes des carences ou de excès seront discutées également. D'abord on commence par l'explication des quelques notions de base.

2.1. Notions de base pour la fertilisation

2.1.1. L'acidité ou pH (ou potentiel hydrogène)

Le pH d'une solution est une mesure de la concentration en ions hydrogène (H⁺). Un ion hydrogène (H⁺) est toujours lié à une molécule d'eau (H₂O) et c'est pourquoi qu'on écrit très souvent l'ion hydrogène comme H₃O⁺. De plus la concentration en ions (H₃O⁺) dans le milieu est importante, de plus le milieu est acide et de plus bas qu'est le pH.

Par l'absorption des éléments nutritifs, la plante peut modifier le pH de la solution nutritive dans le sol. Par absorption des cations comme K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et NH₄⁺ la plante cède au milieu des quantités équivalentes de H₃O⁺. Par absorption d'anions comme NO₃⁻, SO₄⁻ et H₂PO₄⁻ la plante cède des quantités équivalentes de HCO₃⁻. Si une plante absorbe des quantités équivalentes de cations et anions, le pH du milieu nutritif ne changera pas. Si la plante absorbe relativement plus de cations, le pH baissera (par augmentation d'ions H₃O⁺ dans le milieu), en cas d'une absorption relativement plus élevées d'anions, le pH augmentera



La plante peut pousser dans une zone très large de pH. Si le pH reste longtemps en dessous de 4 les racines peuvent être endommagées, tandis que au-dessus de pH 7 certains éléments deviennent moins disponibles comme la phosphate, le fer, le manganèse et le bore. Temporairement et exceptionnellement le pH de la solution fertilisante peut baisser jusqu'à 3 sans conséquences pour la culture.

2.1.2. L'équilibre ionique (antagonisme)

Les solutions nutritives pour les différentes espèces sont élaborées de telle façon que le rapport entre les ions est calculé en fonction de l'absorption par la plante (solution équilibrée). En fonction des circonstances l'absorption de certains éléments peut fluctuer et ainsi dérégler la solution nutritive. Dans le milieu racinaire on peut alors constater des taux trop élevés de certains ions et trop bas d'autres. L'excès d'un élément peut bloquer l'absorption d'un autre (antagonisme).

En général on peut dire que les ions monovalents comme le potassium (K^+), le nitrate (NO_3^-) et le phosphate ($H_2PO_4^-$) sont plus facilement absorbés que les ions bivalents comme le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{++}) et le sulfate (SO_4^{--})

L'excès d'un élément peut limiter l'absorption d'un autre élément. Plusieurs antagonismes existent et parmi les principaux antagonismes (l'excès du premier limite l'absorption du second) nous pouvons citer :

- le potassium et le calcium
- le potassium et le magnésium
- l'ammonium et le calcium
- le calcium et le magnésium
- le calcium et les principaux oligo-éléments (B, Cu, Mn, Fe)
- le phosphore et le zinc
- le phosphore et le cuivre
- le fer et le molybdène.

Si on cultive sur substrat de graminées marines (*Posidonia oceanica*) l'antagonisme bore/potassium est très important.

2.1.3. Carences et toxicités

Les carences peuvent être subdivisées en carences vraies et carences induites. On parle de carence vraie quand l'élément est présent en trop faible quantité, soit parce que le substrat ou le sol ne le contiennent pas, soit parce que les cultures ont appauvri le sol. En cas d'une carence induite, l'élément est présent dans le sol mais une ou plusieurs causes empêchent l'absorption par la plante. Les causes les plus répandues pour les carences induites sont :

- l'antagonisme

- une trop forte fixation par le sol
- un pH trop élevé : tous les oligo-éléments à l'exception du molybdène
- un sol asphyxiant : fer
- les conditions climatiques : sécheresse : bore
forte pluie : lessivage de N
- la température du sol : phosphore sur tomate en cas d'une température trop faible.
- un système racinaire peu développé.

Les toxicités sont dues à des excès d'éléments dans le sol. Les fortes fumures peuvent provoquer des accidents. Certains traitements peuvent libérer des éléments et provoquer ainsi des toxicités comme p.e. la désinfection à la chaleur qui peut provoquer un excès en ammoniac.

2.2. Azote

L'azote se trouve dans le sol sous forme organique et minérale. La minéralisation de l'azote organique se fait par l'ammonification et la nitrification. Cette transformation est effectuée par la microflore du sol. Dans le sol l'ammonium se transforme très vite (2 à 3 semaines) par la microflore en nitrate. La plante absorbe l'azote comme ammonium (NH_4^+) et comme nitrate (NO_3^-).

En donnant une solution nutritive à la plante contenant 5 à 10 % d'ammonium et le reste en nitrate, la plante absorbe de préférence l'ammonium. Une solution contenant uniquement de l'ammonium peut être considérée comme toxique et les fruits de tomate et de poivron montrent déjà après quelques jours des symptômes de nécrose apicale (antagonisme avec calcium). L'azote sous forme nitrique est très soluble, donc bien disponible pour les plantes mais facilement entraînées par les eaux (lessivage).

Dans la plante on trouve l'azote surtout dans les protéines qui sont les composantes fondamentales de la matière vivante en général. Il est donc essentiel pour la croissance des végétaux.

Une carence en azote se manifeste en général par une décoloration vert clair

puis jaunâtre de toute la végétation, commençant à la base de la plante. La croissance aérienne de la plante est ralentie mais par contre les racines se développent davantage. Surtout le développement végétatif aérien est freiné, la partie générative semble moins affectée (on constate parfois une sorte de floraison de secours). Une carence en azote rend les plantes plus vulnérables à certaines maladies comme le *Footrytis* chez la tomate, par exemple. Une carence en azote chez le melon se caractérise par un jaunissement diffus du limbe et des nervures de la feuille.

On constate un début de carence sur les feuilles de base gagnant par la suite tout le feuillage. Le fruit est de taille réduite, de forme allongée et prend une couleur très claire. Une carence en azote chez la tomate se caractérise généralement par un jaunissement des feuilles à la base de la plante, la plante devient peu vigoureuse avec des folioles petites et de couleur vert pâle. Les nervures sont parfois violacées.

Une carence en azote n'arrive pas souvent, sauf en cas de négligence ou en cas d'irrigation abondante (et donc lessivage). On constate aussi parfois des carences en cas d'un apport de fumier contenant encore beaucoup de paille. L'azote se fixe alors sur la paille. On peut remédier facilement à une carence par un apport d'azote (p.e. de l'ammonitrite). Le rétablissement se voit après environ 2 semaines.

En ce qui concerne les excès en azote, on peut distinguer 2 cas. Dans le premier cas, la plante pousse dans un milieu trop riche en azote. On voit alors apparaître de symptômes semblables à ceux dus à un excès de sel : couleur de la végétation très foncée et croissance luxuriante au début et freinée par des concentrations plus élevées. Dans le deuxième cas le sol est pauvre en azote et les dégâts sont occasionnés par une surdose abrupte d'azote ; dans ce cas on constate une brûlure des racines entraînant la brûlure des feuilles et parfois la mort de la plante entière, surtout sur des sols légers. Cette brûlure est irréversible et on a pu le constater à plusieurs reprises chez les agriculteurs débutants de Limaguess et Jemna. Des doses d'azote, apportés en couverture, qui ne provoquent pas une brûlure sur sol limoneux peuvent détruire complétement la plante sur sol léger.

2.3. Le phosphore

La solution du sol ne contient que relativement peu de phosphore. Ceci est dû au fait que les phosphates (les sels contenant du phosphore) sont très peu solubles.

On peut rencontrer le phosphore dans le sol sous 3 formes :

- la forme diffusible : le phosphore est alors lié au complexe argilo-humique.
- les formes combinées : dans les sols acides elles sont en partie immobilisées par les hydroxydes d'aluminium et de fer, pour les libérer on doit chauler ou apporter de l'humus
- les formes insolubles : en terre calcaire, l'acide phosphorique donne des phosphates de calcium, dont certaines formes sont insolubles (p.e. les phosphates tricalciques). Un équilibre s'installe entre le phosphate de calcium précipité et le phosphate dans le liquide du sol. Cet équilibre est réglé entre autre par le pH.

Par son insolubilité le lessivage du phosphore ne se produit presque pas. Au contraire l'accumulation peut se faire dans des couches superficielles du sol. A cause de son insolubilité on ne constate presque jamais de l'excès en phosphore, par contre des carences en zinc et cuivre peuvent être induites.

La plante absorbe le phosphate sous formes de $H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{--} en fonction du pH du sol. Le phosphore joue un rôle important dans la formation de protéines et d'enzymes. Il intervient dans la photosynthèse, dans la dégradation des glucides (respiration), comme transporteur d'énergie et dans la formation d'acides nucléiques.

Le phosphate a un effet bénéfique sur le développement racinaire. C'est la raison, ensemble avec son insolubilité, pourquoi qu'on le donne très souvent comme fumure de fond et pas comme fumure d'entretien dans les concepts de fertilisation classique. Le phosphore améliore la qualité des fleurs ce qui a des répercussions favorables sur la nouaison. Une déficience en phosphore peut provoquer des malcolorations à l'intérieur des fruits de tomate et melon.

Les symptômes de carence sur beaucoup de plantes, dont la tomate, sont une couleur violacée ou rouge intense par la formation d'anthocyane. La croissance est diminuée, la floraison retardée et la fécondation se fait mal, et la maturation est perturbée. Sur les feuilles âgées de concombre et melon peuvent apparaître des ponctuations internervaires marron s'élargissant en zones marron se nécrosant ; la tâche est entourée d'une bordure jaune. Chez la tomate on constate, à part la coloration violette sur les folioles (face inférieure) et sur la tige, des tiges très, fines, des plantes rabougries et des fruits creux et mal colorés. Les causes de cette carence peuvent être multiples :

- carences vraies
- pH trop élevé en sol très calcaire
- pH trop bas (< 5,5) avec présence d'aluminium
- excès d'ions nitrate ou de sulfate
- excès de zinc ou d'autres métaux lourds
- température du sol trop basse.

Les corrections peuvent se faire soit en donnant un apport d'acide phosphorique dans l'eau d'irrigation, soit en augmentant la température du sol, soit par des pulvérisations foliaires (avec des engrais foliaires, MAP ou DAP), ou par des arrosages au pied des plantes par le superphosphate 45, MAP ou DAP.

2.4. Le potasse

On rencontre le potassium dans le sol uniquement sous forme minérale. Le potassium dans le sol provient, soit de la décomposition de la matière organique et des minéraux du sol, soit des engrais. Il n'est qu'en partie assimilable par la plante, car une certaine fraction du potassium libéré ou apportée est fixée entre les feuillets de certaines argiles, ou fixée au complexe argilo-humique du sol. Cette fixation n'est pas toujours définitive et le potassium peut être à nouveau libéré. Le potassium n'est pas aussi mobile que l'azote, mais la perte par drainage peut être relativement importante dans des sols légers avec une faible C.E.C.

Dans les plantes le potassium existe sous formes minérales solubles et à un moindre degré dans les sels de certains acides organiques. Il est très mobile dans la plante et rapidement redistribué. Le K^+ ion joue un rôle important dans le réglage

du valeur osmotique des cellules et dans la structure des parois des cellules. Il règle l'absorption de l'eau de la plante et garantie la solidité de la plante. On le trouve aussi fixé aux enzymes. Le potassium augmente la résistance aux maladies et à la sécheresse.

Une carence en potassium se caractérise par une croissance ralentie et des tiges plus minces. Très spécifique est la nécrose brune du bord des feuilles débutant sur les jeunes feuilles de melon et tomate. Les feuilles de l'extrémité de la plante du melon prennent un aspect d'ombrelle. Au niveau du fruit une carence se traduit en formant des melon à chair grumeleuse et amère. Les fruits de tomate deviennent moux et montrent des défauts de coloration. On appelle pour ces raisons très souvent le potasse l'élément de qualité.

La carence potassique peut être causée par l'antagonisme avec calcium, magnésium et bore ou par un excès d'azote. Pour la tomate on prétend qu'il existe une certaine relation N/K. On maintient de préférence un rapport nitrate / potassium de 2 à 2,5 ; autrement la plante absorbe trop de nitrate.

Un excès en potassium se manifeste comme un excès de salinité. La croissance est freinée et on aperçoit une végétation de couleur vert foncé. Un excès potassique provoque une carence en magnésium et calcium.

2.5. Le calcium

Le calcium peut se trouver dans le sol comme ion dans la solution, absorbé au complexe argilo-humique ou sous forme minérale en outre comme carbonate de calcium (CaCO_3).

Entre ces 3 formes s'installe un certain équilibre. La quantité de calcium fixée au complexe argilo-humique est importante, car à côté de calcium ils s'y trouvent surtout d'ions H^+ . Beaucoup de Ca^{++} signifie alors très peu de H^+ , donc un sol basique et un pH élevé. La teneur en calcium influence alors le pH et ainsi l'absorption des oligo-éléments.

L'absorption de calcium par la plante dépend de la quantité de calcium présent dans la solution du sol et aussi de la présence des ions K^+ et NH_4^+ dans la

solution (antagonisme). En général la concentration de calcium dans la solution du sol est nettement plus élevée que la concentration en potassium. Pourtant dans la plante on observe la situation inverse, car l'ion K^+ pénètre plus facilement dans les racines que le Ca^{++} . Les fruits contiennent en général moins de calcium que les feuilles, ceci est dû à la mobilité très faible du calcium dans la plante. Les jeunes tissus doivent être bien pourvus de calcium autrement il y a risque de dépérissement.

Le calcium constitue environ 50% des cendres de la plante. C'est un constituant important des parois cellulaires, qui influence ainsi la structure et la solidité de la plante. Il influence la perméabilité des parois cellulaires et dans le liquide cellulaire la valeur osmotique. Il joue un rôle important dans la neutralisation des acides organiques en formant parfois des cristaux, comme p.e. de l'oxalate de calcium.

La carence absolue en calcium est rare en culture classique mais en culture sur substrat ou sable cette carence peut arriver. Cependant on peut observer des carences en calcium dans un organe de la plante, souvent le fruit. Un symptôme général est le flétrissement et la mort des bourgeons terminaux (dessèchement) et le redémarrage de la plante sur les pousses axillaires.

Chez la tomate une carence en calcium débute généralement par les jeunes feuilles (donc l'apex de la plante). Les folioles deviennent vert sombre, plus pâle à jaune en bordure du limbe. On assiste à la nécrose et mort des fleurs et les fruits montrent des nécroses apicales. Une carence en calcium rend les plantes plus sensibles à certaines maladies cryptogamiques comme p.e. la sensibilité plus accentuée au *Botrytis*.

La nécrose apicale (Blossom end rot) est liée à un manque de calcium au niveau du fruit. Les symptômes sont des petites nécroses brun clair ou des tâches à plages noires concaves à l'extrémité du fruit, le pénétrant parfois profondément. Ces symptômes peuvent apparaître chez tomate et piment (poivron). Des analyses ont montré que le taux de calcium dans un fruit est plus faible à l'extrémité et c'est pour cette raison qu'on trouve la nécrose à cet endroit.

Le stress hydrique (sècheresse) favorise la nécrose apicale. Ceci est dû à une plus faible absorption de calcium par les racines et à un changement de distribution de calcium dans la plante (parfois le calcium est soustrait au fruit). Une teneur faible en calcium dans le sol par rapport à une salinité élevée provoque une faible disponibilité de calcium pour la plante. Ces 2 facteurs expliquent pourquoi la manifestation de la nécrose apicale semble apparaître surtout dans les conditions suivantes :

- une teneur élevée en potassium : cette teneur élevée freine l'absorption du calcium et le transport dans la plante est aussi entravé.
- un excès d'azote : par l'ammonite (NH_4^+) le calcium est moins facilement absorbable. La production d'acides organiques est stimulée par le potassium et le nitrate, ce qui diminue la mobilité de calcium.
- des sols acides et pauvres en calcium, ce qui ne veut pas dire qu'on ne le trouve pas dans des sols riches en calcium.
- la technique d'irrigation à la raie. L'irrigation à la raie provoque plus de nécroses apicales que celle de goutte à goutte. En plus des manques d'eau qui peuvent survenir entre 2 irrigations successives (intervalle trop longue), l'apport abondant d'eau peut provoquer de micro-asphyxies réduisant l'absorption racinaire momentanément et conduisant à un manque de calcium (les binages où le travail du sol "mutillant" les racines peuvent provoquer les mêmes effets que les micro-asphyxies).
- une température élevée : dans ces conditions il y a plus d'apparition de nécrose apicale, soit par une croissance rapide, soit par une transpiration forte.
- en irrigation fertilisante selon les exportations la teneur en Calcium de la solution peut être trop faible (suivant la teneur de l'eau brute) en période chaude (été), comparée aux besoins de la plante et par rapport à l'hiver.

On peut remédier en partie à la nécrose apicale en traitant les plantes avec du nitrate de calcium (0,5%) où en diminuant la teneur en K^+ dans les solutions fertilisantes, si possible. Notons que les eaux géothermales contiennent en général entre 7 et 13 me de Ca, ce qui est largement suffisant pour les cultures.

Un excédent de calcium freine la croissance de la plante et donne une végétation vert foncée. En plus l'excès entraîne une augmentation du pH et provoque ce qu'on appelle la chlorose calcaire par des carences en Zn, Fe et Mn,

c.à.d. des jaunissements par une absorption freinée de ces oligo-éléments. En plus sur poivron et tomate, un excès en calcium donne des symptômes de "goldspeck" sur les fruits (petits points jaunes), ce qui déprécie fortement la qualité visuelle du fruit et sa valeur marchande sur le marché international. Pour éviter le goldspeck on peut essayer d'augmenter la teneur en K^+ de la solution nutritive. En général nous avons remarqué moins de "goldspeck" sur des tomates cultivées dans des serres chauffées par rapport aux fruits récoltés dans des serres froides.

2-6- Le Magnésium

Dans le sol le magnésium peut se trouver sous 3 formes : absorbé au complexe argilo-humique, dans la solution du sol ou comme minéral surtout sous forme de carbonate ($MgCO_3$). La quantité d'ions Mg^{++} dans la solution du sol est en général plus faible que la quantité d'ions (Ca^{++}) et (K^+).

Les racines absorbent le magnésium sous forme de l'ion (Mg^{++}) et le transportent, comme le calcium, vers les feuilles. L'antagonisme avec les autres cations (surtout K^+ et H^+) influence beaucoup cet absorption. Surtout dans les sols acides, ou on trouve beaucoup d'ions (H^+) libre, cet antagonisme est important.

Comme le potassium et le calcium, le magnésium est un constituant des paroi cellulaires de la plante et influence donc la solidité des tissus. C'est un élément constitutif de la chlorophylle, qui joue un rôle prédominant dans l'activité enzymatique concernant le métabolisme des hydrates de carbone. Le magnésium est assez mobile dans la plante (contrairement au calcium) et peut être véhiculé à partir des vieilles feuilles vers les feuilles plus jeunes.

Une carence commence alors dans les feuilles âgées. Elle se manifeste par une chlorose (jaunissement) des feuilles, chez la tomate par un jaunissement internervaire homogène et assez rude. Le processus final aboutit à la nécrose. Les causes peuvent être, à part des carences vraies et les antagonismes mentionnés plus haut, une asphyxie racinaire, une manque d'eau, une température trop basse du sol ou une culture bien chargée. Surtout chez les tomates on trouve parfois des carences légères juste avant la récolte sur des plantes très chargées.

Un excédent en magnésium donne les mêmes symptômes qu'un excès général en sels (croissance freinée et couleur de la végétation vert foncé). On peut remédier à une carence en magnésie par une pulvérisation foliaire de sulfate ou nitrate de magnésie (1 à 2 kg/hl) et un apport au sol d'engrais magnésiens. En plus il faut surveiller le pH du sol (pas trop bas) et ne pas donner trop de potassium. Le fumier bovin est une bonne source de magnésium et en Tunisie les eaux géothermales sont assez riche en Mg (3 à 6 me).

2-7- Le Soufre

On trouve le soufre dans le sol, oxydé comme sulfate (SO_4^{--}), dissous dans la solution du sol, comme minéral ou comme gypse précipité ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). L'élément est aussi fixé à la matière organique. Beaucoup d'engrais contiennent du soufre comme p.e. superphosphate (12%S). Pour éviter un taux trop élevé de sulfate dans le sol, les horticulteurs peuvent utiliser des engrais ne contenant pas de soufre comme p.e. le triplephosphate, le nitrate de magnésium, le nitrate de calcium et le nitrate de potasse.

La plante absorbe le soufre contenu dans la solution du sol comme ion de sulfate (SO_4^{--}). Dans la plante le soufre joue un rôle dans la formation des protéines.

Une carence de soufre débute dans les jeunes feuilles, car le sulfate n'est pas très mobile dans la plante, en tout cas moins mobile que le nitrate. C'est la raison pour laquelle un début de carence en azote se voit d'abord à la base de la plante (vieilles feuilles), contrairement à une carence en soufre. Une carence plus avancée en soufre ressemble à une carence en azote, c'est à dire que toute la plante devient vert pâle à jaune. Sur tomate on observe une coloration violette des nervures, des pétioles et des tiges. Les folioles montrent en plus d'un léger jaunissement internervaire, des tâches violettes et nécrotiques.

Un surplus en soufre provoque les mêmes symptômes qu'un excès de salinité. En général un excès en sulfate n'est pas trop toxique pour les plantes et en tout cas l'effet de réduction du rendement par le sulfate est très faible par rapport aux chlorides (p.e. NaCl). Une teneur supérieure à 10 me de SO_4^{--} provoque le goldspeck chez la tomate. La teneur en SO_4^{--} des solutions équilibrées se situe en général entre 2 à 3 me. Pour augmenter la salinité de la solution nutritive on utilise très souvent des sulfates (parce que moins toxique que les chlorides) mais le taux ne

doit pas dépasser de préférence les 8 à 10 me. Dans les eaux géothermales du Sud Tunisien les teneurs en SO_4^- sont relativement élevées et se situent en moyenne entre 500 et 600 mg/l (10 à 12 me) avec un minimum de 350 mg/l (7.5 me) et un maximum dépassant 1000 mg/l (soit 22 me), d'où l'intérêt d'éviter l'utilisation d'engrais contenant des sulfates.

LES ELEMENTS NUTRITIFS DANS LA PLANTE

2ème PARTIE

LES OLIGOELEMENTS

3. Les oligo-éléments

3.1 Bore

Le bore se trouve dans la solution du sol sous forme de $H_2BO_3^-$ ou $B(OH)_4^-$, généralement en très faible concentration. L'élément bore est très vite lessivé. Le transport dans la plante se fait lentement. Bore est actif dans les phénomènes du métabolisme et est aussi un élément de structure. Une carence sévère en bore freine le développement racinaire et on constate très souvent un dépérissement des bourgeons terminaux. Une carence peut se manifester abruptement et l'apparition d'une déformation des feuilles ou fruits est très typique. Une carence faible se caractérise par un léger flétrissement de la végétation et parfois par une chlorose des feuilles âgées. Si la carence persiste, la végétation peut devenir frêle et on doit faire attention en tuteurant la tomate. Chez la tomate et poivron (piment) on constate très souvent le brunissement des vaisseaux (et ceci est très bien visible sur les feuilles en les tenant vers le soleil). Chez la tomate la carence en bore provoque un léger jaunissement internervaire des folioles qui restent de petite taille et s'enroulent. Par la suite l'ensemble de la plante est affecté.

On peut remédier à une carence en bore en donnant une fumure contenant du bore, comme p.e. borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), qui contient 11% de bore (la dose d'application est $2g/m^2$), Sporumix B (0.6%B), Boracine ou autre engrais liquide contenant du bore. En général le fumier contient une certaine quantité de bore. Les causes d'une carence peuvent être multiples :

- pH trop alcalin : formation de borate de calcium qui est insoluble.
- chaulage excessif
- antagonisme : rapport Ca/B trop élevé
rapport K/B trop élevé

- faible luminosité
- sécheresse

Un excès en bore est rare. Un excès s'extériorise par une brûlure de la bordure et de la pointe des feuilles. Chez le concombre la bordure de la feuille jaunit (comme un citron), chez la tomate la couleur des feuilles devient gris. Le melon et le concombre sont connus comme des plantes sensibles, la tomate comme moyennement sensible.

3-2- Cuivre

Le cuivre est absorbé par la plante sous la forme de Cu^{++} , mais peut aussi être lié à la matière organique (e.a. des chélates naturelles). Le cuivre est peut être l'élément le moins important de tous les oligo-éléments, en tout cas la quantité nécessaire est beaucoup plus faible que pour les autres éléments. Tous les sols contiennent normalement suffisamment de cuivre, cependant une carence peut se produire sur des sols sablonneux. Un pH élevé, mais quand-même pas trop alcalin, favorise l'absorption par la plante. Le cuivre joue un rôle dans les réactions enzymatiques et dans les réactions de métabolisme.

Une carence en cuivre peut parfois provoquer des chloroses, mais pas toujours. En cas de chlorose, les symptômes peuvent se confondre avec les carences azotées, car le cuivre joue un rôle dans la réduction des nitrates. Très souvent la chlorose est suivie par une nécrose d'une partie du limbe des feuilles (chez concombre). La végétation peut devenir un peu raide et la couleur peut être altérée, parfois on constate une couleur bronzâtre des feuilles (chez melon). Chez tomate une carence provoque l'enroulement des folioles (comme p.e. les symptômes en cas de sécheresse) et même parfois l'enroulement en spirale des pétioles. Très souvent les plantes de tomate deviennent rabougrées. Des carences peuvent être induites par :

- sol alcalin (excès de chaulage)
- antagonisme : excès de molybdène
 - excès de phosphore
 - excès de zinc
 - excès de matière organique

On peut bien remédier à une carence en traitant la plantes par un produit cuprique comme p.e. l'oxychlorure tétranique (cuprosan), sulfate de cuivre. Un excès en cuivre ne se produit pas souvent. Ceci peut être causé par un pH acide, un enracinement superficiel de la plante ou des traitements fongiques. Les symptômes d'un excès ne sont pas décrits dans la documentation consultée.

3-3- Manganèse

Le pH du sol détermine la solubilité de l'ion Mn se trouvant dans la solution du sol. En cas d'un pH élevé (pH > 7.6) le Mn se précipite comme MnO_2 . Le MnO_2 devient soluble en cas d'un pH faible et peut devenir alors toxique. En désinfectant le sol à la vapeur une partie du MnO_2 se transforme en Mn_2+ . Le manganèse se lessive facilement. La plante absorbe le manganèse sous forme de Mn_2+ . Le transport à l'intérieur de la plante est relativement bien. Le manganèse intervient dans les réactions enzymatiques.

On peut constater de l'antagonisme entre le manganèse et quelques autres oligo-éléments . Le plus connu est l'antagonisme entre le fer et le manganèse et vice versa. Parfois on peut constater une carence en fer et manganèse en même temps (chlorose calcaire).

Une carence en manganèse se manifeste par un jaunissement internervaire diffuse des folioles, ressemblant à une carence en magnésium mais la chlorose est plus fine. De l'autre côté une certaine confusion pourrait être possible avec les symptômes dûs à une carence en fer, mais généralement une chlorose en fer est mieux répartie sur toute la surface de la feuille. Une carence en fer se situe en général sur les parties jeunes de la plante, celle en manganèse sur les feuilles âgées. Chez la tomate on peut constater la déformation et l'enroulement des folioles. D'autres causes de carence à part celles citées ci-dessus sont une sécheresse excessive et l'enrobage des oxydes de manganèse par la matière organique contenue dans les eaux.

La meilleure remède est la pulvérisation, à plusieurs reprises de sulfate de manganèse (0.2%) en ajoutant de préférence un mouillant. Quelques fongicides contiennent de manganèse (p.e. mancozèbe, manèbe...).

Un excès en manganèse se manifeste par une chlorose et nécrose, débutant dans des feuilles âgées. Par la suite les symptômes se déplacent vers les jeunes feuilles. La correction d'un excès est relativement difficile. On peut essayer à augmenter le pH ou en ajoutant des chélates de fer.

3-4- Molybdène

La plante absorbe le molybdène sous forme de MoO_4^{--} . L'élément influence certains systèmes enzymatiques. Le plus connu est la transformation de nitrate car l'enzyme (la réductase de nitrate) contient du molybdène. La plante n'a besoin que de très faibles quantités, plus petites que celles nécessaires en autres oligo-éléments. Le molybdène est, contrairement aux autres oligo-éléments, très mal absorbé en cas d'un sol à pH faible, et on appelle alors souvent la carence en molybdène la "maladie acide". En général dans des analyses de routine on ne détermine pas le molybdène.

Une carence chez la tomate commence à la base de la plante. On assiste à un léger jaunissement internervaire et de la bordure des folioles qui peuvent s'enrouler. Une carence est très marquée sur le melon. Les feuilles deviennent vert pâle puis jaune ivoire. La plante reste naine et en cas d'une carence très marquée, la bordure des feuilles se dessèche progressivement. Les tissus morts prennent une teinte tabac et se replient vers le haut.

On peut remédier à une carence en pulvérisant les feuilles avec du molybdate d'ammonium (2g/hl) ou molybdate de sodium. On peut aussi apporter du molybdate d'ammonium directement dans le sol (1kg/ha). Des engrais foliaires peuvent contenir du molybdène comme Actigil et Wuxal.

3-5- Zinc

Zinc se trouve dans la solution du sol sous forme de Zn_2^+ ou de chélates et est absorbé par la plante sous ces 2 formes. La mobilité du zinc dans la plante est lente. Zinc intervient dans les réactions enzymatiques.

Une carence peut être induite par un excès d'acide phosphorique, un excès de

cuivre et un pH élevé. Une carence commence en général à l'apex de la plante (certains auteurs contestent cela et disent à la base de la plante) et se manifeste par une chlorose internervaire suivie par une nécrose le long des nervures. Les plantes sont rabougries et les feuilles s'enroulent (tomates). Chez tomates les folioles deviennent plus petites et les fruits plus pâles. La correction peut se faire à moyen d'un traitement à base de sulfate de zinc (0,3g/l).

On peut remédier à un excès en zinc en augmentant le pH du sol ou en ajoutant de chélates de fer (antagonisme fer-zinc). On peut diviser les symptômes en 2 groupes :

- la tête de la plante est plus jaune, à cause d'une carence en fer induite par l'excès en zinc.
- une chlorose le long des nervures et la bordure des feuilles âgées et même parfois brûlure (nécrose).

3-6- Fer :

L'élément fer est très bien connu par tout le monde parce qu'on le trouve en grande quantité sur terre. L'écorce terrestre contient 5% de fer et certains sols ont la couleur brune ou rouge (Fe_2O_3). Le fer est présent dans la solution du sol comme $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Par l'insolubilité de ces 2 éléments le taux en fer dans le liquide du sol est faible.

La plante absorbe le fer comme Fe_2+ ou Fe_3+ et aussi lié à des matières organiques. C'est un élément essentiel pour la formation du chlorophylle. Le transport à l'intérieur de la plante est difficile. Une partie de fer dans la plante n'est pas active et cela peut fausser les résultats des analyses.

Une carence débute par les jeunes feuilles, qui chlorosent entièrement, sauf le long des nervures qui restent vertes. Les jeunes pousses ont une croissance réduite. Des tâches nécrotiques peuvent apparaître en cas d'une carence grave. Il s'agit en général des carences induites : sol riche en calcaire actif, pH trop alcalin (>7,5), température trop élevée et excès de lumière, excès de métaux lourds. Le produit de solubilité de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ est très faible.

$$(\text{Fe}^{+++}). (\text{OH}^-) = 5.10e-40$$

(à 25°C)

A un pH faible la concentration de (OH^-) est plus basse et il y a alors plus de Fe^{+++} en solution. Le fer est absorbé par la plante à un endroit bien spécifique notamment juste après l'apex des racines. Un système racinaire ayant beaucoup de racines capillaires et bien ramifié est plus apte à absorber du fer. Le rosier et le fraisier sont connus comme des plantes sensibles aux carences en fer. La tomate et les cucurbitacées sont considérées comme sensible. Les plantes de tomate, au début de la récolte, peuvent montrer des symptômes de carence, dus essentiellement à une croissance accélérée et le mauvais transport du fer dans la plante. Après un certain temps ces symptômes disparaissent. La formation des algues demande une quantité non négligeable de fer et peut aussi provoquer une carence.

On peut remédier à des carences en utilisant des chélates. Les chélates sont des structures annulaires synthétiques à grandes molécules qui peuvent contenir des métaux. Le pouvoir d'absorption de fer dépend du pH et de la présence d'autres cations polyvalents (Ca, Mn, Zn, Cu). Ces cations peuvent, à un pH bien déterminé, écarter de ces complexes le fer, qui se précipite par la suite comme $Fe(OH)_3$. Chaque chélate est actif à un pH déterminé, c'est à dire que le calcium n'écarte pas le fer à ce pH

Fe-EDDHA :	utilisable de pH 3 à pH 9
HEDTA :	pH 3 à pH 7.8
DTPA :	pH 3 à pH 7
EDTA :	pH 3 à pH 6.5

Ces chélates sont vendus sous différentes formes commerciales. Le Fe-EDDHA par exemple sous les noms de sequestrène 138Fe, librel Fe80 contenant environ 6% de fer. La dose d'emploi est de $5g/m^2$. On le dissout dans l'eau et puis on le verse sur le sol. Après on irrigue abondamment pour apporter la chélate au niveau des racines et pour éviter la destruction par les UV.

Un excès en fer n'est presque pas connu. Une surdose de DTPA est toxique. Le Fe-EDDHA est moins toxique mais en cas d'une surdose les bordures des feuilles peuvent colorées rouge.

FICHE PRATIQUE D'IRRIGATION DE TOMATE MELON ET FAKOUS SOUS SERRE *

1. Le besoin en eau d'une culture sous serre peut être calculé à partir de la formule suivante :

$$\text{besoins en litres par m}^2 = (0.62 \times \text{Rgs} / 58.6 - 0.8) \times \text{coefficient cultural}$$

avec $\text{Rgs} = 0,7 \times \text{Rg}$

Rgs = rayonnement global sous serre (cal/cm²)

Rg = rayonnement global mesuré à l'extérieur de la serre (cal/cm²)

Le rayonnement global extérieur est enregistré, en Joules par cm², à plusieurs stations d'appui, notamment : Zerkinc, Smida, Tozeur, Gafsa, Ouled Mohammed, Chebika et Monastir.

Le coefficient cultural

Tomate :

- du semis au début de la floraison.....	0.5
- floraison 1er bouquet à la floraison 2ème bouquet.....	0.65
- floraison 2ème bouquet à la floraison 4ème bouquet.....	0.8
- floraison 4ème bouquet au début de la récolte.....	1.1
- début de la récolte à la mi-récolte.....	1.0
- de la mi-récolte à la fin de la récolte.....	0.9

melon et fakous :

- du semis ou plantation à la floraison mâle.....	0.4
- floraison mâle à la floraison femelle.....	0.5
- floraison femelle au stade grossissement.....	0.8
- grossissement au début de la récolte.....	1.0
- récolte.....	0.8

EXEMPLE

Rg enregistré à Smida le 25/01/89 : 1135 Joules par cm²



SUITE EN

F

2



MICROFICHE N°

07569

République Tunisienne

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية
وزارة الفلاحة

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي
تونس

F 2

conversion de cette valeur en cal/cm² :

$$1135 \text{ Joules} : 4.18 = 271 \text{ cal}$$

$$\text{donc sous serre } R_{gs} = 0.7 \times 271 = 190 \text{ cal}$$

dans les serres se trouvent des tomates, actuellement au stade floraison 1er bouquet, donc coefficient cultural = 0.65

$$\text{besoin en eau} = 0.65 \times (190/58.6 \times 0.62 - 0.8) = 0.786 \text{ litres par m}^2$$

pour toute la serre de 8.5 m x 64m (544 m²), les besoins sont 427 litres.

la serre est équipée d'irrigaines qui débitent 5 litres par mètre linéaire sous une colonne d'eau de 1.5 m (donc pour 8 gaines : 2500 litres par heure). L'agriculteur doit alors laisser couler l'eau pendant 10 minutes (427 x 60/2500)

2. Une formule globale exprimant les besoins en eau à partir du Rg enregistré en Joules par cm² est indiquée ci-dessous en fonction de la superficie de la serre (cc = coefficient cultural)

largeur (m)	longueur (m)	superficie (m ²)	besoins de la serre (litres par serre)
8.5	64	544	cc x (0.96 Rg - 435)
8.5	63	535.5	cc x (0.95 Rg - 428)
8.5	62	527	cc x (0.93 Rg - 421)
8.5	60	510	cc x (0.90 Rg - 408)
8	64	512	cc x (0.91 Rg - 410)
8	63	504	cc x (0.89 Rg - 403)
8	62	496	cc x (0.88 Rg - 397)
8	60	480	cc x (0.85 Rg - 384)

(Rg en Joules par cm²)

Par exemple : pour le cas de Smida sous serre de 64m sur 8.5 m et une culture ayant un cc de 0.65, on obtient 425.5 litres pour un Rg de 1135 J/cm².

FICHES TECHNIQUES DE FERTILISATIONS DES CULTURES DE TOMATE, MELON ET FAKOUS

A. La fertilisation calculée à partir des éléments fertilisants exportés.

Les besoins journaliers d'une culture en azote, potasse et phosphore peuvent se calculer à partir des exportations de ces éléments par la culture. Ces exportations sont fonction du rendement de la culture.

Le tableau ci-dessous indique les normes méditerranéennes, exprimant l'exportation de N, P₂O₅ et K₂O en kg par 1000 kg de fruits récoltés.

Désignations	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
tomate	2.7	1.2	5.4
melon / fakous	3.9	1.7	6.9

1. Phosphate

Deux cas peuvent se présenter :

1.1. La totalité de P₂O₅ est donnée sous forme de "Super 45", avant la mise en place de la culture. La quantité à distribuer est obtenue en multipliant le rendement visé par 1.2 (pour la tomate) et par 1.7 (pour le melon et le fakous). Dans les sols trop calcaires le P₂O₅ donné sous cette forme est très peu assimilable par les plantes.

exemple :

tomate

supposons un rendement visé de 7 kg/m² soit 3500 kg/serre de 500m², quantité de P₂O₅ à distribuer par serre : 1.2 x 3.5 = 4.2 kg ce qui correspond alors à 4.2 x 100 / 45 = 9.3 kg de super 45 (100 kg

de l'engrais "Super 45" contient 45 kg de P_2O_5)
melon supposons un rendement de 3 kg/m² soit 1500 kg/serre de 500m².
quantité de P_2O_5 à distribuer par serre : $1.7 \times 1.5 = 2.55$ kg ce qui
correspond à $2.55 \times 100 / 45 = 5.6$ kg de Super 45

1.2. Le phosphate est donné sous forme d'acide phosphorique. Un litre de produit commercial contient 530 ml de P_2O_5 (53%), à une densité de 1.6, ce qui correspond alors avec $530 \times 1.6 = 848$ g de P_2O_5 .

En reprenant les exemples cités ci-dessus il faut alors pour la tomate à peu près 5 litres du produit commercial d'acide phosphorique et 3 litres pour le melon et fakous. Cette quantité est à distribuer lors des irrigations à partir d'une solution-mère faite dans un seau suspendu dans la serre ou d'un fût posé sur la bassin. Il faut quand-même faire attention à ne pas dépasser 2.5 meq d'acide phosphorique dans la solution car on risque alors de trop acidifier l'eau d'irrigation. Ce seuil correspond à 205 ml d'acide phosphorique injectée par 1000 litres d'irrigation.

exemple :

tomate : rendement visé 12 kg/m², soit 6 tonnes par serre (500 m²) sur une durée de fertilisation de 180 jours. La quantité de P_2O_5 à distribuer : $1.2 \times 6 = 7.2$ kg correspondant à 8.5 litres d'acide phosphorique ($7.2/1.6 \times 0.58 = 8.5$) ou une dose journalière de 47.2 ml.

En mois de janvier le besoin journalier en eau d'irrigation est d'environ 660 litres par serre (rayonnement global = 1200 Joules). Afin de ne pas dépasser 2.5 meq de P_2O_5 , on ne peut pas mélanger plus que 135 ml d'acide dans la solution-mère, nous constatons qu'avec 47.2 ml qu'on est très loin de ce limite.

Remarque importante : l'acide phosphorique s'utilise généralement dans des solutions totalement ou partiellement équilibrées.

2. Azote et potasse

Les apports d'azote et de potasse sont de préférence à distribuer lors des irrigations. On a établi des tableaux mentionnant les quantités à donner à la culture

de tomate, melon ou fakous en fonction de la durée de la culture et du rendement visé.

L'application de potasse peut se réaliser à partir de sulfate de potasse (contient 48 à 52% de K_2O) ou de nitrate de potasse (contient 46% de K_2O et 13% de N). L'utilisation de sulfate de potasse est à proscrire sur les sites ayant de l'eau d'irrigation trop sulfatée, dépassant un taux de 100 à 150 mg de SO_4^{--} /par litre d'eau.

L'apport d'azote se réalise à partir d'ammonitrate 33, contenant 33% de N. Il ne faut pas oublier à tenir compte de l'azote se trouvant dans le nitrate de potasse (13%). En cas d'irrigation tous les 3 jours, on multiplie les doses du tableau par 3.

En général on ne fertilise pas une culture durant toute la période de végétation. On commence la fertilisation environ 3 à 4 semaines après le semis direct et on cesse les applications environ 2 à 3 semaines avant la fin de la culture. On peut alors admettre que :

$$\text{durée de la fertilisation} = \text{durée de la culture} - 5 \text{ semaines}$$

Exemple

Serre de tomate à Ouled Mohammed

- l'eau d'irrigation contient environ 380 mg de sulfates par litre, ce qui en principe exclut l'utilisation du sulfate de potasse.
- le rendement visé est environ 15 kg/m^2 soit 7500 kg par serre (superficie arrondie à 500 m^2)
- la durée de la culture : semis direct début septembre, récolte prévue jusqu'à fin avril/début mai, soit une durée de fertilisation de 210 jours.
- La quantité de K_2O à donner : $5.4 \times 7.5 = 40.5 \text{ kg}$
100 kg de nitrate de potasse contiennent 46 kg de k_2O (46%), donc pour apporter 40.5 kg de K_2O il faut :

$$100 \times 40.5 / 46 = 88 \text{ kg de nitrate de potasse}$$

- 100 kg de nitrate de potasse contiennent 13 kg de N (13%) alors 88 kg de nitrate de potasse apportent donc 11.4 kg de N, quantité à réduire de la quantité d'azote à fournir.

- la quantité de N à apporter : $2.7 \times 7.5 = 20.25$ kg

la quantité de N à apporter sous forme d'ammonitrate 33 :

$$20.25 - 11.4 = 8.85 \text{ kg N}$$

Ce qui correspond alors avec $100 \times 8.85 / 33 = 26.8$ kg d'ammonitrate. ou exprimé en dose journalière :

$128 \text{ g d'ammonitrate } (26800 / 210) = 419 \text{ g de nitrate de potasse.}$

3. Mode d'application

3.1. Fertilisation à partir d'un seau en plastic (contenu de 10 litres), suspendu dans la serre à une hauteur un peu plus élevée que le niveau d'eau dans le bassin. Il faut avant tout connaître le débit d'injection de la solution-mère dans la conduite d'irrigation. La solution-mère est préparée par l'agriculteur dans le seau. Le débit à conseiller doit être autour de 20 l/h, ce qui correspond à un diamètre d'opercule d'environ 1.8 à 2 mm.

Supposons que les besoins en eau de la serre au mois de décembre (serre équipée avec irrigaines) est de l'ordre de 500 l / jour. Cette quantité est obtenue en ouvrant la vanne d'irrigation pendant environ 12 minutes (les irrigaines débitent, sous une colonne d'eau (CE) de 1.5 m, 5 l par mètre linéaire et par heure, soit 5×63 (longueur de la serre) \times 8 (nombre de gaines dans la serre) = environ 2500 l/heure)). Dans le cas où l'agriculteur irrigue tous les 2 jours, il ouvre la vanne alors pendant 24 minutes. Il remplira alors le seau de 8 litres d'eau et fera y dissoudre la dose journalière multipliée par 2.

Plus tard en saison les besoins journalières s'élèveront à, par exemple 2000 L. La vanne d'irrigation restera alors ouverte pendant 48 minutes. Deux cas peuvent se présenter :

- l'agriculteur irrigue pendant 18 minutes avec de l'eau pure, ensuite il ouvre la petite vannette au-dessous du seau et continue en injectant la solution-mère dans l'eau.
- l'agriculteur fait 2 fois le mélange dans le seau : 48 minutes correspondent avec une quantité à injecter de 16 l de solution mère.

3.2. Fertilisation en utilisant un fût posé sur le bassin. Supposons un fût de 200 litres et un débit horaire de 200 litres. Dans le cas cité ci-dessus : 12 minutes d'irrigation correspondent avec une injection de 40 litres de solution-mère, le fût peut alors contenir le mélange pour 5 jours ou la dose journalière pour 5 serres irriguées l'une après l'autre. 48 minutes correspondent avec une injection de 160 litres. L'agriculteur remplit le fût avec 160 l d'eau et y mélange la dose pour une serre ou pour plusieurs serres irriguées simultanément.

B. La fertilisation à partir des solution partiellement équilibrées

La solution nutritive est partiellement équilibrée en N, P et K et on ne tient pas compte de la teneur initiale de l'eau. Les concentrations à atteindre sont, par litre de solution :

meq de l'ion	correspond à	mg d'élément fertilisant	
14.4 N		201.6	N
2.2 HPO_4^-		156.2	P_2O_5
5.2 K^+		244.4	K_2O

B.1. Le phosphore est donné sous forme d'acide phosphorique 53%.

156.2 mg P_2O_5 par litre de solution correspondent à l'injection de 184 ml d'acide dans 1000 litres d'eau d'irrigation.

B.2. Le potasse est donné sous forme de nitrate de potasse. On veut dissoudre 244.4 mg de K_2O par litre d'eau, ou 244.4 g K_2O par 1000 litres d'eau, ce qui correspond à 531 g de nitrate de potasse à injecter dans 1000 litres d'eau.

B.3. L'azote est injecté sous forme d'ammonitre et de nitrate de potasse : 531 g de nitrate de potasse contient 69 g de N. Reste à donner (201.6 - 69 =) 132.6 g de N sous forme d'ammonitre 33% contenant 16.5% de NO_3^- et 16.5% de NH_4^+ , ce qui correspond à 402 g contenant 16.5% de NO_3^- et 16.5% de NH_4^+ , ce qui correspond à 402 g (132.6 x 100/33) d'ammonitre.

En résumé on peut dire que la solution mère à injecter dans 1000 litres d'eau, doit contenir environ :

530 g de nitrate de potasse
400 g d'ammonitre
180 ml d'acide phosphorique 53%

La quantité d'eau nécessaire pour irriguer une culture sous serre peut être calculée à partir du rayonnement global. Il faut faire attention à bien dissoudre le nitrate de potasse et l'ammonitre dans le fût ou seau. Après la dissolution complète on y injecte l'acide.

Besoins journaliers (arrondis) en ammonitrate et nitrate de potasse en fonction de la durée de fertilisation et du rendement estimé, en grammes par serre, culture de TOMATE (basés sur les exportations).

rendement		besoins totaux (a-b, c)		15		17		19		20		25		30		35	
		ammoni- trite (1)	nitrate potasse (2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
kg / m ²	tonnes / serre	durée fertilisation en semaines en jours															
3	15	5,3	17,6	50	168	74	246	66	220	89	294	91	301	84	279	72	239
5	25	8,8	29,3	84	279	104	345	93	309	114	377	121	385	101	335	87	287
7	35	12,4	41,1	118	391	134	444	120	397	126	419	151	402	101	335	108	359
9	45	15,9	52,8	151	503	148	492	132	440	151	503	121	402	101	335	108	359
10	5	17,6	58,6	168	558	178	591	159	529	189	628	151	502	126	419	130	431
12	6	21,2	70,4					199	661	227	754	182	603	151	503	130	431
15	75	26,5	87,9									201	670	168	558	144	478
18	9	31,8	105,6														
20	10	35,2	117,2														

L'HUMIDIFICATION DES SERRES *

1. Introduction

Le climat dans les régions du Sud Tunisien un peu éloigné de la côté est caractérisé par des températures extérieures très élevées à la fin du printemps et en début de l'automne. Les températures maximales au niveau de l'air extérieur sont toujours supérieures à 30°C et se situent en général autour de 35°C, alors que les températures minimales nocturnes durant la même période sont en général supérieures à 20°C.

Les hygrométries relatives durant ces mêmes périodes sont basses et descendent durant plusieurs heures par jour en dessous de 25 à 30%, avec des valeurs minimales qui peuvent atteindre même 10%.

Sous ces conditions des taux de renouvellements horaires élevés sont nécessaires pour permettre de maintenir des températures sous serre proche de celles enregistrées en plein air. Pour atteindre ceci un taux de renouvellement de 40 à 60 est nécessaire et pour réaliser ceci il faut un minimum de 25% de surfaces de ventilation et ceci si possible en combinant des ouvertures latérales avec des ouvertures dans le toit. Ces conditions d'aération conduiront à créer sous serre des hygrométries similaires à celle en plein air, conditions qui en général sont défavorables pour la croissance de la plante et pour la fructification, nécessitant une très bonne conduite de l'irrigation pour éviter un état de stress hydrique chez la plante.

Lorsque l'eau est pulvérisée dans un local, sans que de la chaleur soit fournie en même temps, l'énergie qui est nécessaire pour l'évaporation de l'eau est enlevée à l'air environnant. Autrement dit, l'air va se refroidir en s'humidifiant. Comme ce processus s'effectue parallèlement, ou presque, aux courbes adiabatiques on appelle ce processus le refroidissement adiabatique.

* 9^{ème} séminaire National de formation dans le Cadre Projet Géothermie PNUD/TUN 85/004Tozeur, 15 et 16
Mars 1990.

La direction exacte du tracé du refroidissement pendant l'humidification est obtenue avec l'échelle marginale $dh/dx = 4,19 \times t_e$, mais en général ce tracé ne s'éloigne pas beaucoup du tracé 0, pour des températures qui ne sont pas très élevées (20 à 40°C).

En s'évaporant l'eau absorbe l'énergie du milieu ambiant par la chaleur latente de vaporisation. L'évaporation d'un kg d'eau crée en générale une quantité de froid à peu près équivalent à 600 frigorie ou kcal.

Selon le diagramme de Mollier un air extérieur à 35°C et à 30% HR contient 10.6 g d'eau par kg d'air et a un contenu enthalpique 14.8 kcal/kg d'air. Si on veut atteindre une hygrométrie de 70% sans changement d'état enthalpique (donc en refroidissement adiabatique) l'air doit contenir 14.2 g/kg d'eau et atteindre une température de 25.6°C. L'air doit donc se charger de 3.6 g/kg par l'évaporation de l'eau. Si l'air est encore plus sec (20% HR) son contenu enthalpique pour la même température (35°C) sera de 12.6 kcal/kg et l'air contiendra seulement 7 g/kg d'eau. Son humidification jusqu'à 70% nécessitera une augmentation de la teneur en eau avec 4.8 g/kg, ce qui permettra de baisser la température à 22.7° C. Il est donc clair que le refroidissement adiabatique est le plus efficace dans des régions sèches.

Plusieurs méthodes dynamiques peuvent être utilisées pour le refroidissement adiabatique, notamment : le pad and fan cooling, la brumisation, la nébulisation (ou fog system) et l'évaporation statique.

2. La brumisation

La pulvérisation de l'eau dans la serre permet de vaporiser une partie de cette eau, ce qui contribue à augmenter l'humidité et à diminuer la température dans la serre. On peut utiliser plusieurs types de pulvérisateurs, notamment l'aspersion fine ou la brumisation grossière et la brumisation fine. La brumisation grossière fonctionne sur des pressions de 1 à 2 bars et des grandes quantités d'eau dans la serre, d'où un effet plus important mouilleur du substrat et des cultures qu'humidificateur de l'air. La brumisation fine fonctionne à des pressions plus élevées (4 à 5 bars) et permet de créer des gouttelettes fines dont la dimension est d'environ 50 μ , ce qui permet de créer un espèce de brouillard lourd descendant

lentement et se vaporisant plus facilement. L'effet mouilleur est encore important mais l'humidification de l'air est déjà beaucoup plus efficace et il est possible de contrôler soit la température, soit l'hygrométrie de la serre par un asservissement thermostatique ou hygrostatique.

3. La nébulisation ou fog system

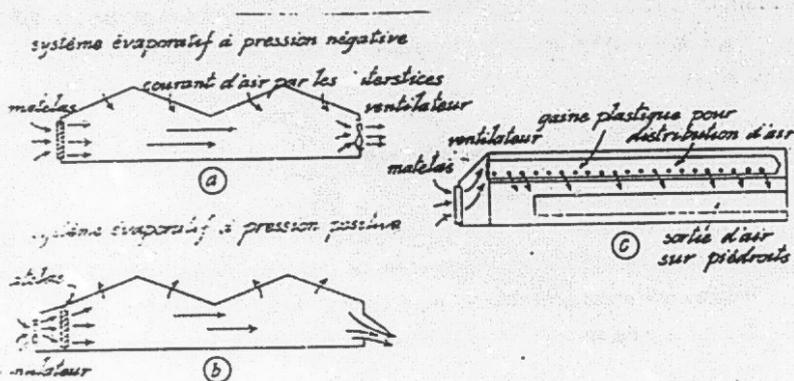
La nébulisation essaie de créer de gouttelettes très fines (10 à 20 μ), presque invisibles, et se vaporisant presque tout de suite lors de leur passage dans l'air. Plusieurs systèmes sont utilisés pour créer ce fog, notamment :

- des diffuseurs haute pression : l'eau est diffusée à une pression de 40 à 80 bars
- des diffuseurs à pression moyenne (4 bars) mais dans lesquels on injecte également de l'air sous pression, ce qui permet de créer des gouttelettes très fines à une pression relativement faible.
- des disques avec des brosses tournant à haute vitesse (10.000 tours/minute) et permettant de pulvériser ainsi très finement des gouttes d'eau arrivant à pression presque nulle (système Airbi).

Tous ces systèmes nécessitent un taux de renouvellement important, sinon leur efficacité diminue rapidement. C'est ainsi qu'en Espagne et faute d'aération correcte on arrive à atteindre dans les serres seulement des températures supérieures à l'extérieur de 3 à 4°C. par contre en France l'utilisation d'un bon taux de renouvellement permet de faire descendre la température en dessous de celle à l'extérieur.

4. Pad and fan cooling

Il consiste à faire passer à travers un "matelas" mouillé, moyennant un ventilateur, un courant d'air plus ou moins sec, qui en se chargeant de l'eau évaporée au niveau de matelas, se refroidit, pour être utilisé après pour climatiser l'enceinte cultivée. Il existe deux types de "cooling systems" notamment celui à pression négative ou à "dépression" et celui à pression positive ou à "surpression" (voir schéma ci-dessous).



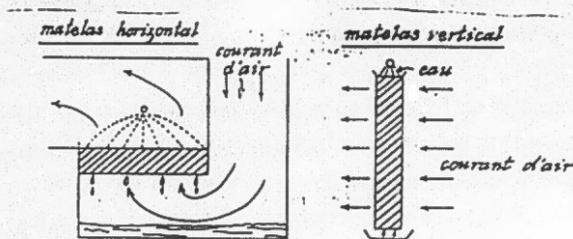
Dans le système à pression négative (a), une surface d'évaporation est aménagée à une extrémité de la serre et les ventilateurs d'aspiration de l'air sont installés à l'autre extrémité. Cette méthode conduit à la création de gradients de température entre l'entrée et la sortie de l'air. Des ouvertures dans la construction (surtout en serre plastique) sont responsables de la pénétration de volumes d'air parasite et à cause de la sous-pression à l'intérieur de la serre il y a également admission de poussière.

Dans le système à pression positive (b) on crée une température plus uniforme et l'entrée des poussières n'est plus possible puisque le ventilateur souffle tout l'air entrant dans la serre à travers un filtre (matelas d'eau). Ce système est particulièrement recommandé pour les serres plastiques. Il est également possible de faire circuler l'air à travers des gaines plastiques perforées (c), l'air sortant alors à travers les sorties latérales.

Le matelas humidificateur (pad) peut être monté en position horizontale ou verticale (schéma ci-dessous). Le système horizontal est plus coûteux mais présente beaucoup moins de problèmes en ce qui concerne l'encrassement par l'utilisation des eaux saumâtres. Pour diminuer ce problème d'encrassement il est conseillé d'utiliser plus d'eau que l'on a besoin pour l'évaporation.

Dans les régions poussiéreuses il y a néanmoins toujours des possibilités

d'encrassement par la poussière et la mise au point "d'une piège à sable" est fortement recherchée.



Si on regarde sur le diagramme de Mollier il est clair que l'efficacité de cet outil diminue très fortement lorsque le taux d'humidité relative s'élève, ce qui explique les mauvaises performances du cooling dans les serres vitrées à Monastir.

La puissance des ventilateurs à utiliser se situe normalement entre 3 et 5 W/m^2 de surface cultivée et se calcule à partir de la formule suivante :

$$P = (V_a \times p) : n$$

avec V_a : la taux de ventilation exprimé en m^3 par m^2 et par seconde.

P : la perte de pression dans le paroi humidifié exprimé en Pascal ; cette perte est de 2 à 5 mm CE, soit 20 à 50 Pascal.

n : Le rendement des ventilateurs (en général 0.7).

Le taux de ventilation est égale à : $V_a = (V \times a) : (S \times 3600)$

avec V : le volume de la serre (en m^3)

a : le taux de renouvellement par heure

S : la surface au sol de la serre (en m^2)

3600 : le facteur pour ramener le taux de ventilation de l'heure à la seconde

Indépendamment du système utilisé (surpression ou dépression) le débit de ventilation horaire (D) nécessaire est égal à : $D = V \times a$

Par contre si on utilise le système par dépression la distance entre les ventilateurs ne peut pas dépasser d'axe en axe les 7 m, sous peine de ne pas obtenir une répartition homogène, donc le nombre de ventilateurs et leur débit horaire dépend du choix de l'axe de la serre dans lequel on va installer le ventilateur et le matelas.

Ce choix nécessite la connaissance des dimensions de la serre (largeur et longueur), et du taux de renouvellement. Ce taux doit se situer entre 45 et 90 avec une préférence d'une valeur supérieure à 60. Sous dépression ou surpression minimale de 3 mm CE l'air avance de 1 m/s soit donc 3600 m par heure, ce qui limite la distance entre le pad et le fan à 3600/a. Cette distance se situera donc entre 45 et 90 m, mais de préférence elle restera inférieure à 60 m.

Après avoir opté pour l'axe de fonctionnement on peut calculer le nombre minimal des ventilateurs à installer (N), notamment en divisant la largeur de la paroi dans laquelle on a installé les ventilateurs.

Le débit minimal de chaque ventilateur (d) sera alors égal au débit de ventilation horaire (D) divisé par le nombre de ventilateurs (n) : $d = D/N$

De préférence on choisit des ventilateurs à grand débit avec un diamètre de 1m et à faible vitesse de rotation (environ 400 tours/minute). Au niveau du matelas on doit choisir un matériel dont l'efficacité est supérieure à 80%. L'efficacité du matelas s'exprime en la comparant humide et par la relation : $\frac{t_e - t_s}{t_e - t_{min}}$

avec t_e : la température de l'air extérieur

t_s : la température juste après la sortie du matelas

t_{min} : la température du thermomètre humide

Plusieurs matériaux sont utilisables comme matelas, notamment :

- nodules d'argile expansées de 20 à 30 mm sur une épaisseur de 7 cm (5% d'efficacité)
- fibre de lin sur une épaisseur de 2.5 cm (75 % d'efficacité)
- fibre de coco sur une épaisseur de 2.5 cm (85 % d'efficacité)
- copeaux de bois sur une épaisseur de 2.5 cm (95 % d'efficacité)
- papier traité Humex en modules préfabriqués de 5 cm d'épaisseur (95 % d'efficacité)

La quantité d'eau nécessaire se calcule à partir du diagramme de Mollier. Si on veut humidifier un air qui se trouve à 34°C et à 30% HR (cet air contient 10 g d'eau par kg d'air et est à une enthalpie de 60 kJ/kg) jusqu'à 80% HR on doit augmenter la teneur en eau jusqu'à 14.4 g/kg et la température théorique atteindra alors 23.4°C. La densité de l'air étant d'environ 1.2 on peut supposer que 1 m³ d'air pèse 1.2 kg et que par m³ d'air il faut donc ajouter 4.4 g/kg x 1.2 kg/m³ = 5.28 g

d'eau/m³ d'air ou de 5,28 l par 1.000 m³ d'air.

Pour une serre de 500 m² avec un volume de 1250 m³ et un taux de renouvellement de 60 le débit horaire des ventilateurs serait donc de 75.000 m³ et la quantité d'eau à évaporer de $75 \times 5,28 \text{ l} = 396 \text{ l}$ par heure. Ceci permet de calculer le débit horaire nécessaire car il est souhaitable d'avoir un surplus de minimum 25%, qui sera recyclé, et d'opter pour une pompe permettant de délivrer la quantité d'eau nécessaire. Dans le choix de la pompe intervient également le système de distribution de l'eau sur le matelas (gouttière au-dessus d'un matelas en position verticale, ce qui nécessite une faible pression ; gicleurs sur des matelas plus ou moins inclinés ce qui nécessite une pression minimale de 1 bar). La surface des panneaux (si le coefficient d'efficacité est supérieur à 80%) est de 0.36m² pour un débit horaire de 1000 m³ d'air.

5. L'évaporation statique

En Tunisie des expériences ont été conduites à El Khebeyet et à la Station de Smida afin de tenter d'humidifier l'air par des moyens statiques.

A El Khebeyet des serres classiques de 63 m sur 8 m et cultivées en pastèque, ont été équipées avec 1 ou 2 rideaux en tissu acrylique avec une largeur de 0.5 m, suspendus dans la serre, et humidifiés à partir d'Irrigaines suspendues aussi et délivrant un débit horaire de 0.6 l/h.m sous une pression de 0.5 mCE. Des mesures de températures et d'hygrométries ont été prises à des intervalles réguliers à 1.5 m de hauteur et à 1 m de distance de la toile humidifiée et ceci dans deux conditions d'aération, notamment 7 et 16 % de surface d'aération.

Ces mesures montrent que l'humidification des rideaux permet de réduire la température dans la serre et d'augmenter l'humidité relative (tableaux 1 et 2), mais que les résultats sont meilleurs si l'aération est meilleure. Les valeurs enthalpiques mesurées sous serre témoin et sous serre équipée avec les toiles humides sont à peu près les mêmes (tableau n°3), ce qui démontre l'aspect adiabatique de l'humidification de l'air par voie statique.

Tableau n° 1 - Températures maximales de l'air à El Khebeyet

Désignations	1 rideau mouillé				2 rideaux mouillés		
	aération améliorée		aération classique		aération	améliorée	
Extérieur	32.8	31.8	32.0	32.4	31.7	31.5	32.4
Témoin	38.7	36.3	36.6	38.9	36.4	37.2	36.9
Humidifié	36.1	35.0	31.9	32.3	31.3	31.8	32.0

Tableau n° 2 - Humidités relatives au moment de la température maximale à El Khebeyet (en %).

Désignations	1 rideau mouillé				2 rideaux mouillés		
	aération classique		aération améliorée		aération	améliorée	
Extérieur	35.4	37.2	35.5	39.0	30.8	30.9	35.7
Témoin	45.2	55.5	36.2	48.2	35.8	34.6	37.6
Humidifié	57.7	67.6	49.5	64.7	51.9	56.3	58.7

La teneur en eau a été calculée par le diagramme de Mollier. Ces résultats sont présentés dans le tableau n°4. Les résultats pour la serre avec deux rideaux et une aération améliorée semblent indiquer que l'air s'est chargé en moyenne de 2.2 g d'eau par kg d'air. Pour une serre dont le volume est égal à 1280 m³ on a un poids d'air de 1536 kg, soit une évaporation de 3,38 l d'eau pour un renouvellement de l'air par heure. Si on admet un taux de renouvellement de 20 pour une surface d'aération de 16% au faitage on aurait à évaporer 67.5 l/h, ce qui est légèrement inférieur au débit d'humidification utilisé qui était de 72 l par heure (0.6 l/h.m x 120 m = 72 l/h).

Tableau n°3 - Enthalpie au moment de la température maximale à el Khebeyet (en KJ/kg air sec)

Désignations	1 rideau mouillé				2 rideaux mouillés		
	aération classique		aération améliorée		aération	améliorée	
Extérieur	62.2	60.7	60.1	63.8	55.7	59.8	61.3
Témoin	91.7	92.8	74.1	86.5	71.1	75.5	76.7
Humidifié	94.1	98.6	70.1	84.2	70.4	75.5	78.3

L'évolution des températures de l'air sous serre équipée avec le rideau est présentée. La comparaison de ces deux figures reflète très bien l'influence d'une bonne aération sur l'humidification et le refroidissement adiabatique de la serre. L'utilisation de 2 rideaux par serre permet d'atteindre plus rapidement le maximum d'écart en température. Nous remarquons en effet que des différences de 5 à 5.5°C sont atteintes 3 et 2 heures après le démarrage respectivement dans la serre avec aération classique et la serre à aération améliorée. Les figures n°7, 8 et 9 montrent l'évolution de l'hygrométrie relative. Le degré d'hygrométrie atteinte sous serre dépend beaucoup du nombre de rideaux utilisés mais aussi du degré d'aération. Une augmentation de 15% est atteinte avec 1 rideau et un taux d'aération de 16%, alors qu'une amélioration de 20-25% est atteinte soit avec 1 rideau et un taux d'aération de 7% ou avec 2 rideaux et un taux d'aération de 16%. La combinaison faible aération et 1 seul rideau semble même plus favorable à ce point mais la baisse en température est trop faible.

Tableau n°4 - Teneur en eau de l'air sous serre à El Khebeyet (g/kg air sec)

	1 rideau mouillé		2 rideaux mouillés		
	aération	améliorée	aération	améliorée	
Témoin	14.0	15.4	13	14.5	15.7
Humidifié	15.3	17.5	14.9	16.7	17.7

Les mesures faites à la Station de Smida ont été réalisées juste après les semis directs d'une culture de tomate. Une serre était équipée avec 4 rideaux en coton de

50 cm de large. L'humidification de ces rideaux était réalisée par des gaines portube fonctionnant à 1 bar et débitant environ 2 l/h.m. Il y avait un rideau par 2 lignes jumelées.

Le résultat de ces mesures indiquent que la température sous serre avec 7% d'ouverture pour l'aération a baissé de 5°C (tableau n°5), mais l'effet sur l'augmentation de l'humidité relative est faible (tableau n°6) et ceci montre l'influence du végétal évaporant sur l'hygrométrie sous serre et sur la possibilité de diminuer la température. Dans ces conditions le fonctionnement n'est pas tout à fait adiabatique (tableau n°7) car on assiste à une diminution de la valeur enthalpique dans les serres les rideaux évaporants.

Tableau n°5 - Températures maximales à la station de Smida (en°C)

Observation	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
Témoin	42.0	44.0	43.0	38.0	39.0	36.5	40.0	39.0	40.2
Humidifié	35.0	36.5	35.0	35.2	34.8	34.1	36.0	35.0	35.2
Extérieur	29.6	31.3	28.6	28.4	28.0	30.3	30.4	30.6	29.7

Tableau n°6 - Humidité relatives minimales à la Station Smida (en %)

Observation	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
Témoin	20.0	17.0	20.0	19.0	22.0	26.0	21.0	20.0	20.6
Humidifié	24.0	23.0	23.0	22.0	22.0	30.0	24.0	23.0	23.9
Extérieur	25.2	22.8	33.2	23.2	24.8	28.4	32.4	34.8	28.1

Tableau n°7 - Ethalpies calculées à la station Smida (kJ/kg air)

Observation	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
Témoin	70.5	71.2	73.2	59.5	65.3	63.4	66.6	62.9	66.6
Humidifié	57.7	57.5	56.8	56.3	55.4	60.7	60.1	56.8	57.7
Extérieur	46.9	48.5	49.9	43.2	43.4	50.6	55.3	55.8	49.2

6. Conclusion

Parmi les différentes méthodes utilisées l'évaporation statique est la moins chère et son coût serait de l'ordre de 1 DT/m^2 alors que le pad and fan cooling est la plus efficace et la plus chère pour l'humidification de l'air. L'utilisation de la brumisation est largement dépassé, et les système de nébulisation coûtent également assez cher (5 DT/m^2), mais leur bon fonctionnement nécessite aussi une bonne aération pour obtenir l'effet escompté.

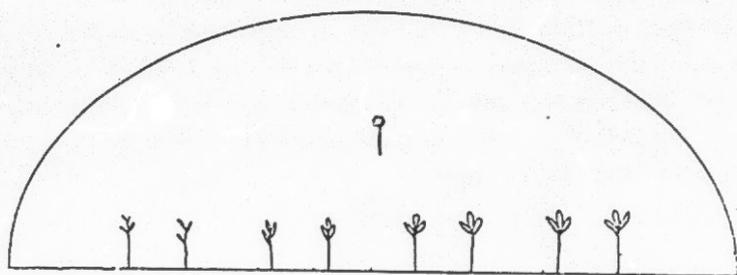


Figure 1 - Serre avec 1 rideau crylique (El Khebeyet)

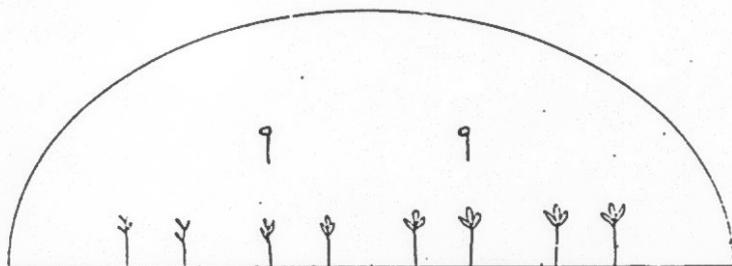


Figure 2 - Serre avec 2 rideaux acryliques (El Khebeyet)

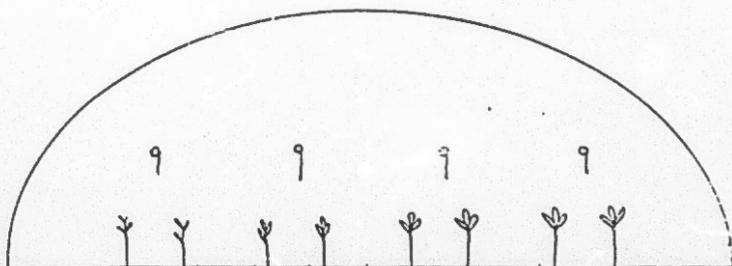


Figure 3 - Serre avec 4 rideaux en coton mixte (Smida)

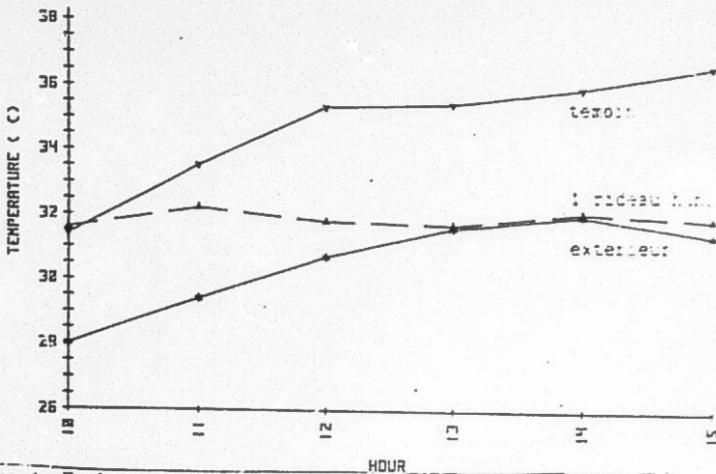


Figure 4: Evolution des températures à El Khebeyet avec aération

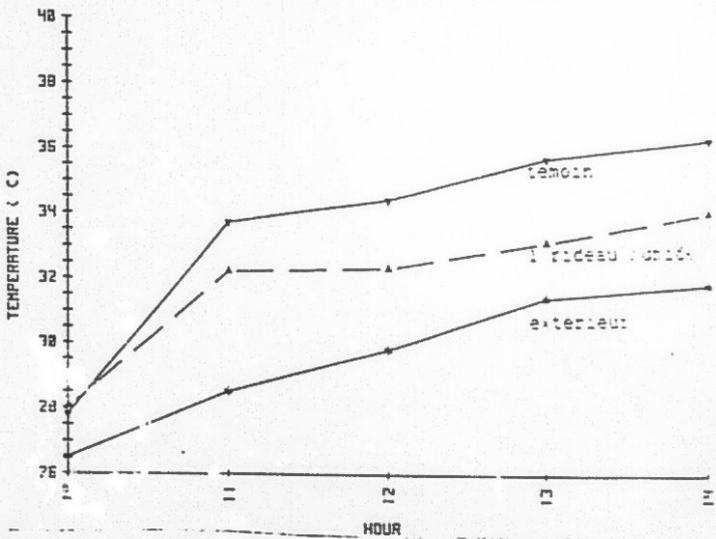


Figure 5 - Evolution des températures à El Khebeyet avec aération

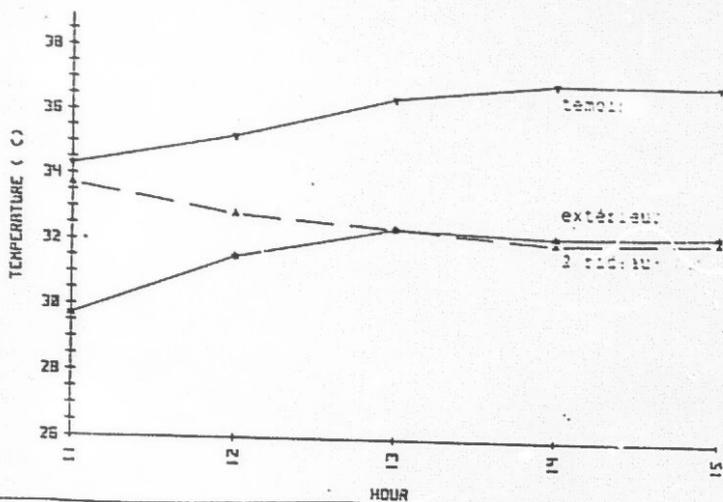


Figure 6 - Evolution des températures à El Khebeyet avec aération.

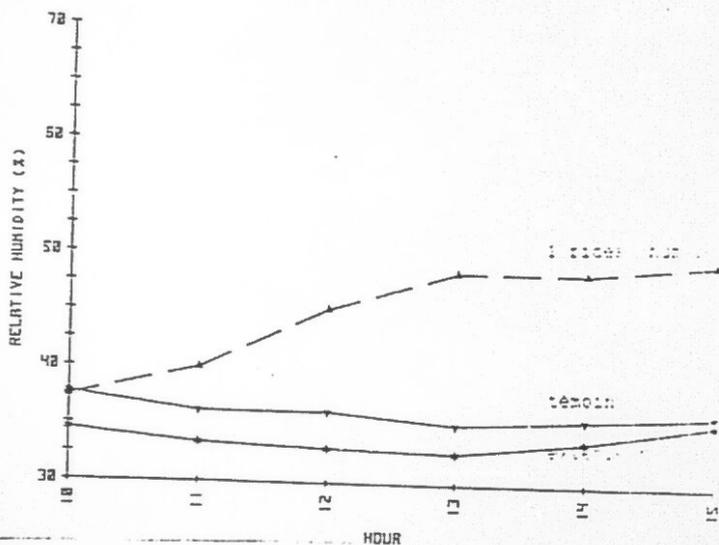
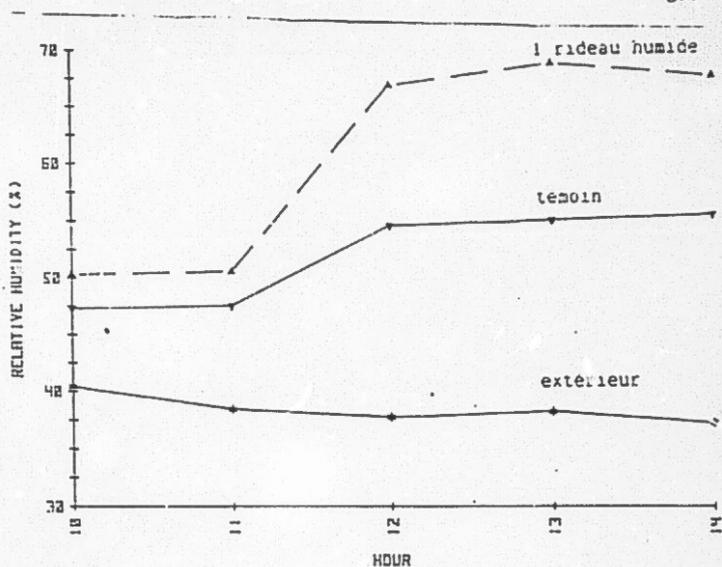
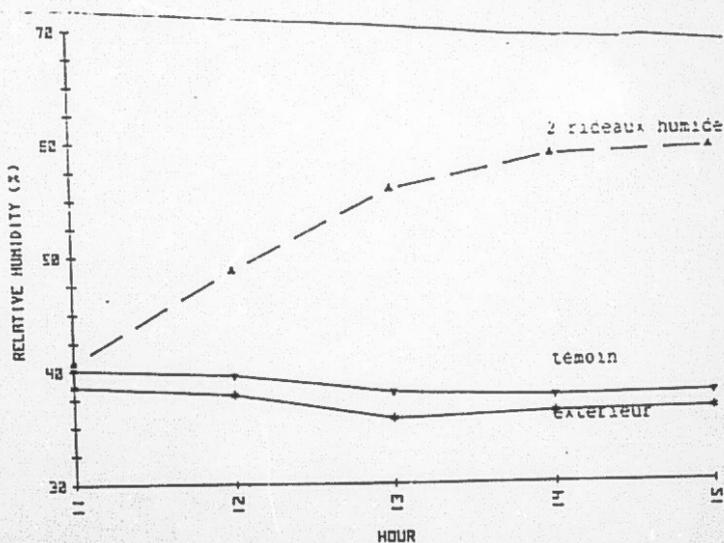


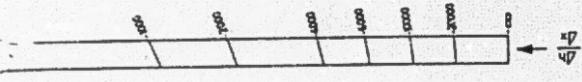
Figure 7 - Evolution de l'humidité relative à El Khebeyet avec amélioration.



- Evolution de l'hygrométrie à El Khebeyet avec aération classique

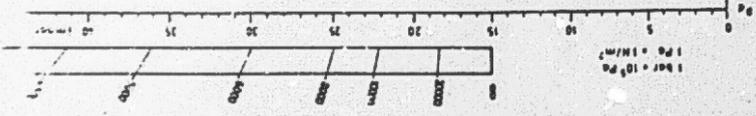
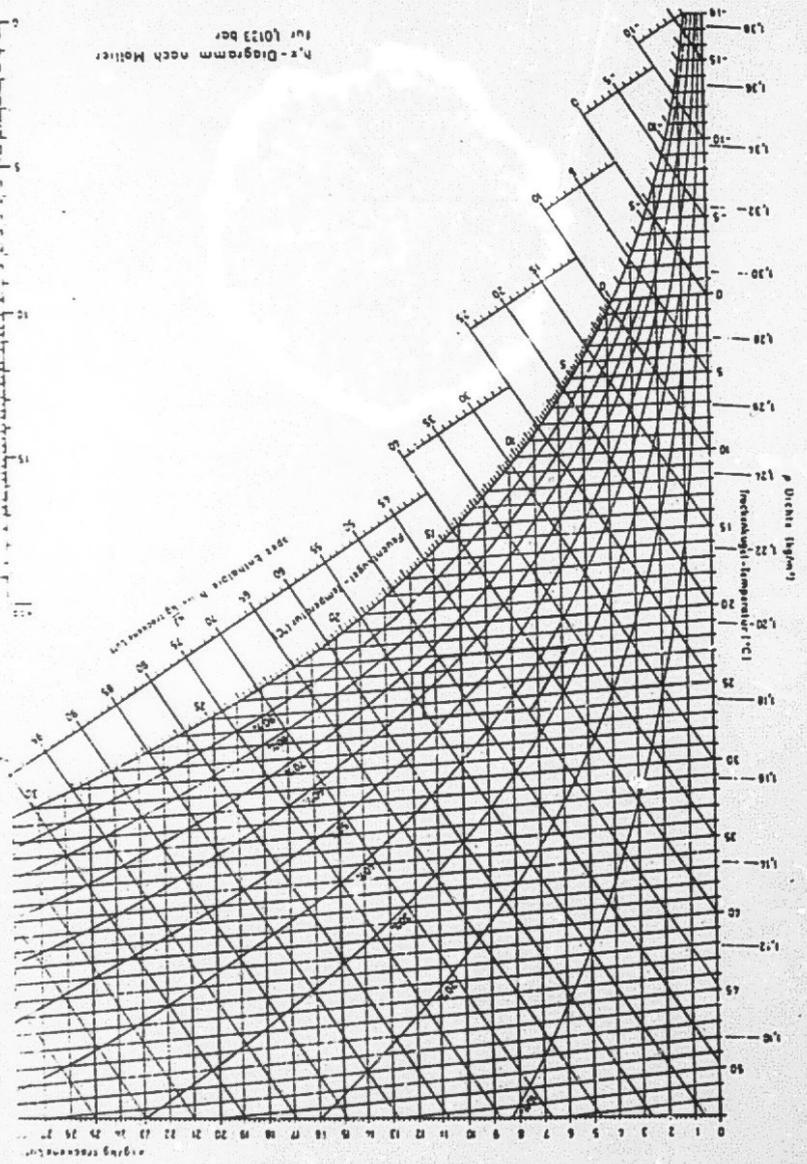


Evolution de l'hygrométrie à El Khebeyet avec aération améliorée



ρ-Diagramm nach Müller
für 10133 bar

ρ = Dichte (kg/m³)
T = Temperatur (°C)
p = Druck (bar)



FIN

82

VUES