

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

1. Généralités	1
1.1 Définitions	1
1.2 Avantages de la technique de culture hors sol	2
1.2.1 Affranchissement des sols contaminés par des agents pathogènes	2
1.2.2 Meilleure performance des cultures	3
1.2.3 Économies d'eau et d'engrais	4
1.3 Inconvénients et contraintes de la technique de culture hors sol	4
2. Différents systèmes de culture hors sol	5
2.1 <i>Nutrient film technique</i>	5
2.2 Aéroponique	8
2.3 Culture sur substrat	10
2.3.1 Quels substrats pour la culture hors sol ?	10
2.3.2 Systèmes de culture sur substrat	11
2.3.3 Bref historique	17
3. Importance des cultures hors sol	19
3.1 France	19
3.2 Europe	20
3.3 Reste du monde	20

Chapitre 1

EFFETS DES DÉFICITS HYDRIQUES ET DES STRESS SALINS

1. Déficits hydriques	21
1.1 État hydrique	21
1.1.1 Potentiel hydrique foliaire	21
1.1.2 Potentiel osmotique	25
1.1.3 Potentiel ou pression de turgescence	27
1.1.4 Teneur en eau relative	28

1.2	Bilan hydrique	29
1.2.1	Bilan hydrique	29
1.2.2	Conclusion	34
1.2.3	Estimation des pertes d'eau des cultures	35
2.	Stress salins	37
2.1	Généralités	37
2.2	Origine des stress salins	37
2.3	Conséquences des stress salins	39
2.3.1	Réponses physiologiques	39
2.3.2	Effet sur le rendement des cultures	40
2.3.3	Effet sur la qualité des produits récoltés	41
2.3.4	Qualité sensible	41
2.3.5	Qualité latente	42

Chapitre 2

EFFETS DES CARENCES ET DES TOXICITÉS MINÉRALES

1.	Généralités	47
1.1	Classification	47
1.2	Rôles des éléments minéraux	48
1.2.1	Fonctions physiologiques	48
1.2.2	Effet des éléments minéraux sur la qualité de la production	51
1.3	Absorption des éléments minéraux	54
1.3.1	Généralités	54
1.3.2	Mécanismes passifs	54
1.3.3	Mécanismes actifs	56
1.3.4	Facteurs influençant l'absorption minérale	57
1.3.5	Absorption élément par élément	59
2.	Carences, déficiences et toxicités	60
2.1	Carences et déficiences	60
2.1.1	Carence en azote	61
2.1.2	Carence en phosphore	61
2.1.3	Carence en potassium	61
2.1.4	Carence en calcium	62
2.1.5	Carence en magnésium	62
2.1.6	Carence en soufre	62
2.1.7	Carence en fer	62
2.1.8	Carence en manganèse	62
2.1.9	Carence en zinc	62
2.1.10	Carence en cuivre	62
2.1.11	Carence en bore	63
2.1.12	Carence en molybdène	63
2.2	Consommation de luxe et toxicité	63
2.2.1	Généralités	63
2.2.2	Toxicité de l'ammonium en culture hors sol	64

Chapitre 3

EFFETS DU MANQUE D'OXYGÈNE

1. Asphyxie racinaire	67
1.1 Respiration des racines	67
1.2 Conséquences du manque d'oxygène	67
1.2.1 Relations hydriques	67
1.2.2 Absorption minérale	68
1.2.3 Fermentations	68
1.2.4 Production	68
1.3 Facteurs influençant le besoin en oxygène	69
1.3.1 Facteurs génétiques	69
1.3.2 État de développement du système racinaire	69
1.3.3 Activité métabolique de la partie aérienne	69
1.3.4 Température	70
2. Apports d'oxygène dans les solutions nutritives	70
2.1 Culture sur substrat	70
2.2 NFT	70
2.2.1 Cas de la tomate	71

Chapitre 4

CHOIX DU SUBSTRAT

1. Caractéristiques des substrats	73
1.1 Propriétés physiques	73
1.1.1 Porosité	73
1.1.2 Rétention et disponibilité de l'eau	75
1.1.3 Teneur en air	80
1.2 Propriétés chimiques	81
1.2.1 Capacité d'échange cationique	81
1.2.2 pH et stabilité chimique	82
1.3 Propriétés biologiques	83
1.3.1 Réactions de biodégradation	83
1.3.2 Rapport C/N	83
1.3.3 Conclusion	84
2. Classification des substrats selon leurs propriétés physiques	84
2.1 Type I : substrats aérés à forte disponibilité en eau	84
2.2 Type II : substrats peu aérés à disponibilité en eau moyenne à forte	84
2.2.1 Sous-type IIa	84
2.2.2 Sous-type IIb	85
2.3 Type III : substrats très aérés à faible disponibilité en eau	85
2.4 Type IV : substrats aérés à forte disponibilité en eau, mais à faible pouvoir tampon de potentiel hydrique	85
3. Description des substrats utilisés en culture hors sol	86
3.1 Tourbes	86
3.1.1 Généralités	86

3.1.2	Différents types de tourbes	87
3.2	Déchets ligno-cellulosiques	87
3.2.1	Écorces	87
3.2.2	Sous-produits de l'agriculture	88
3.2.3	Fibre de coco	88
3.3	Pouzzolane et tufs volcaniques	89
3.4	Sables et graviers	90
3.5	Laine de roche	91
3.6	Perlite expansée	93
3.7	Vermiculite et argile expansée	94
3.7.1	Vermiculite	94
3.7.2	Argile expansée	95
3.8	Polyuréthane, polyacrylamide et polystyrène	95
3.9	Conclusion	95
4.	Choix du substrat et choix du système de culture hors sol	96
4.1	Bacs-tranchées	97
4.2	Bacs surélevés	97
4.3	Bacs légers, sacs et pains	98
4.4	NFT et aéroponique	98
4.5	Tablettes surélevées pour la culture des plantes en pots	98
4.6	Nappe d'irrigation	99

Chapitre 5

ARROSAGE EN CULTURE HORS SOL

1.	Stratégies d'arrosage en culture hors sol	101
1.1	Rappels : l'arrosage en sol	101
1.2	Stratégies d'irrigation en culture hors sol	102
1.2.1	Éviter le dessèchement du substrat – l'exemple de la laine de roche	102
1.2.2	Éviter l'accumulation ionique à proximité des racines	103
1.2.3	Tenir compte des réactions particulières des plantes	103
2.	Pratique de l'arrosage en culture hors sol	107
2.1	Arrosage en fonction de la « bouteille »	108
2.2	Arrosage en fonction du rayonnement reçu	108
2.2.1	Fréquence d'irrigation	108
2.2.2	Volume d'eau par irrigation	109
2.2.3	Arrosages nocturnes	109
2.3	Arrosage en fonction de la différence entre apport et drainage	109
2.4	Arrosage en fonction d'une mesure de perte de poids	111
2.5	Tendances actuelles	111
3.	Suivi de l'arrosage en culture hors sol	113
3.1	Suivi du drainage	113
3.2	Suivi et entretien des goutteurs	114
3.3	Les logiciels de supervision et le phytomonitoring	116

Chapitre 6

FERTILISATION EN CULTURE HORS SOL

1. Confection de la solution nutritive	119
1.1 Analyse chimique de l'eau utilisable.	119
1.2 Choix d'une formulation adaptée à la culture envisagée	119
1.3 Calcul des quantités d'engrais à apporter dans les bacs de solution-mère	120
1.4 Préparation des bacs de solution-mère	120
1.4.1 Engrais complets	120
1.4.2 Solutions préparées à partir de deux bacs d'engrais.	123
1.4.3 Solutions préparées à partir de deux bacs d'engrais et d'un bac d'acide.	124
1.4.4 Solutions préparées à partir de bacs d'engrais simples	128
1.5 Contrôle de la composition de la solution-fille.	129
2. Paramétrage des ordinateurs de régulation de l'irrigation fertilisante	129
2.1 EC	129
2.2 pH.	130
2.3 Composition de la solution nutritive	130
3. Suivi de l'irrigation fertilisante.	130
3.1 EC et pH des solutions nutritives	130
3.2 Composition de l'eau et des solutions nutritives.	133
3.3 Analyse des tissus conducteurs.	135
3.4 Conclusion	135

Chapitre 7

LE CALCUL DES SOLUTIONS NUTRITIVES

1. Rappels de chimie.	137
1.1 Ions.	137
1.1.1 Définitions.	137
1.1.2 Unités.	139
1.2 pH.	140
1.2.1 Notion de pH	140
1.2.2 Mesure du pH	141
1.3 EC	142
1.3.1 Définition de l'EC.	142
1.3.2 Mesure de l'EC	143
2. Contraintes	143
2.1 Phosphates et risque de précipitation	143
2.2 Rôle-tampon des carbonates	145
2.3 Alimentation en fer	147
2.3.1 Rôle des chélates	147
2.3.2 Utilisation des chélates dans les solutions nutritives	147
3. Calcul d'une solution nutritive	148
3.1 Analyses préalables	148

3.1.1	Alcalinité et pH	148
3.1.2	Concentration en éléments minéraux	148
3.2	Détermination des macro-éléments à apporter.	149
3.2.1	1 ^{re} étape : élimination de l'alcalinité de l'eau : détermination de la quantité d'acide à apporter	151
3.2.2	2 ^e étape : détermination de la quantité de nitrate de calcium à apporter pour satisfaire au besoin de calcium	153
3.2.3	3 ^e étape : détermination de la quantité de nitrate d'ammonium à apporter pour satisfaire au besoin d'ammonium	154
3.2.4	4 ^e étape/1 ^{re} approche : détermination de la quantité de sulfate de magnésium à apporter pour satisfaire au besoin de magnésium	155
3.2.5	5 ^e étape/1 ^{re} approche : détermination de la quantité de sulfate de potassium à apporter pour satisfaire au besoin de soufre	155
3.2.6	6 ^e étape/1 ^{re} approche : détermination de la quantité de phosphate monopotassique à apporter pour satisfaire au besoin de phosphore	156
3.2.7	7 ^e étape/1 ^{re} approche : détermination de la quantité de nitrate de potassium à apporter pour satisfaire au besoin de potassium et/ou de nitrates	156
3.2.8	4 ^e étape/2 ^e approche : détermination de la quantité de nitrate de magnésium à apporter pour satisfaire au besoin de magnésium	157
3.2.9	5 ^e étape/2 ^e approche : détermination de la quantité de nitrate de potassium à apporter pour satisfaire au besoin de nitrates	158
3.2.10	6 ^e étape/2 ^e approche : détermination de la quantité de phosphate monopotassique à apporter pour satisfaire au besoin de phosphore	158
3.2.11	7 ^e étape/2 ^e approche : détermination de la quantité de sulfate de potassium à apporter pour satisfaire au besoin de potassium et/ou de sulfates	159
3.3	Détermination des quantités de micro-éléments à apporter.	162

Chapitre 8

RÉDUCTION DES REJETS EN CULTURE HORS SOL

I.	Rejets de solution nutritive en culture hors sol	163
1.1	Arrosage par percolation en solution perdue	163
1.2	Réduction des apports d'éléments inutiles	164
1.2.1	Intérêt de la déminéralisation	165
1.2.2	Techniques de déminéralisation	166
1.3	Ajustement des apports aux prélèvements effectués par les plantes	170
1.3.1	Pilotage de la composition : idéal mais difficile à réaliser.	170
1.3.2	Pilotage de la concentration globale	171
1.4	Surdrainage avec recyclage.	171
2.	Le devenir des résidus de substrats	173
2.1	Élimination des pains de laine de roche usagés	173

2.2	Recyclage des pains de laine de roche usagés	174
2.2.1	Réutilisation agricole sous forme de flocons	174
2.2.2	Réutilisation par l'industrie	174

Chapitre 9

LA MAÎTRISE DU DÉVELOPPEMENT DES MALADIES EN CULTURE HORS SOL

1.	Développements de maladies dus à la technique de culture hors sol	175
1.1	Introduction	175
1.2	Agents pathogènes favorisés par la phase liquide	176
1.3	Facteurs aggravants	177
1.4	Fusarioses	178
2.	Maîtrise sanitaire	178
2.1	Désinfection des substrats	178
2.1.1	Généralités	178
2.1.2	Techniques de désinfection	179
2.1.3	Prévention et méthodes alternatives	181
2.2	Maîtrise des populations d'agents pathogènes dans les solutions nutritives en recirculation	181
2.2.1	Évaluation de la qualité biologique des eaux	181
2.2.2	Techniques de désinfection	182
2.2.3	Vers la lutte intégrée	187

BIBLIOGRAPHIE	203
----------------------------	-----

ANNEXES

1.	Solutions nutritives pour différentes cultures	203
2.	Calcul de solution nutritive par la méthode dite hollandaise	207
3.	Abréviations	209
4.	Unités	212
5.	Préfixes	213
6.	Liste des figures	213
7.	Liste des photographies	214

LEXIQUE	217
----------------------	-----

INDEX	239
--------------------	-----