

REPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques

Direction Générale des Forêts

*Guide pratique de production en hors sol
de plants forestiers, pastoraux et ornementaux
en Tunisie*



Pépinières et reboisement
Pampev Internationale
Nurseries & Reforestation
Membre du groupe GWV / Member of the GWV Group



Direction Générale des Forêts
30 Rue Alain Savary
1002 Tunis-Belvédère - Tunisie

RÉPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques

Direction Générale des Forêts

**Guide pratique de production en hors sol
de plants forestiers, pastoraux et ornementaux
en Tunisie**

**Mohammed S. Lamhamedi
Bertrand Fecteau
Luc Godin
Christine Gingras**

Avec la collaboration de:

**Rafik El Aini
Ghazi Gader
Mohammed Ali Zarrouk**

Sous la supervision de:

**Ahmed Ridha Fekih Salem
Directeur Général des Forêts**

Projet : ACDI E4936-K061229

**PAMPEV INTERNATIONALE Ltée. ©
1220 Marie Victorin, Longueuil (Québec). Canada J4C 2H9
Tel : 450-674-4957; Fax : 450-674-3523
Courriel : info@gwv.com**

2006

© Droits réservés

ISBN : 9973-914-08-2

Avant propos

Depuis son indépendance, la Tunisie s'est fixée une politique orientée vers la conservation et le développement soutenu des diverses ressources dont elle dispose et une exploration de toutes ses potentialités nationales. D'énormes efforts ont, alors, été investis pour un développement humain adéquat et une meilleure maîtrise de la science et de la technologie dans un environnement institutionnel approprié. Les grandes orientations et programmes nationaux, tels que définis par les hautes instances compétentes, ont constitué le cadre général pour l'élaboration des politiques sectorielles dans notre pays. L'environnement politique pour le développement socio-économique en Tunisie a favorisé la rationalisation des actions des différents acteurs économiques, la sauvegarde et l'optimisation de l'utilisation des ressources naturelles renouvelables et la prise de conscience pour la protection des milieux naturels de toute forme de dégradation.

Parmi ces ressources, les forêts qui constituent un patrimoine national aussi bien sur le plan environnemental qu'écologique ou, économique et social, jouissent d'une politique volontariste de reboisement et de conservation pour un développement durable. Cet effort est traduit par la réalisation de plus de 800 000 ha de reboisement depuis l'indépendance dont 500 000 ha depuis 1987. Ces efforts ont permis donc de ramener à 1 230 000 hectares la couverture forestière. Le taux de boisement est passé de 4% à 12,3% actuellement avec l'objectif pour l'horizon 2010 de le porter à 16%.

Les actions entreprises pour atteindre cet objectif demandent à l'État d'y consacrer des ressources importantes. Dans le but d'assurer le succès de ces investissements, le Ministère de l'Agriculture et des Ressources Hydrauliques donne une grande importance à la qualité et au suivi de ses interventions particulièrement dans le domaine du reboisement.

L'Administration forestière s'est engagée concrètement dans cette direction en travaillant entre autre, depuis près de 10 ans, dans la production de plants forestiers de haute qualité dans des pépinières modernisées. Les effets bénéfiques à court terme sont un taux de survie supérieur à la plantation, un meilleur aspect des plants et une croissance plus rapide en plantation, donc une meilleure productivité à moindre coût.

Les 16 pépinières modernisées jusqu'à présent en Tunisie se situent dans des régions distinctes du pays, souvent dans des zones écologiques différentes. Le réaménagement de ces pépinières met l'accent sur l'introduction de nouvelles techniques de production de plants en hors sol avec l'utilisation de pots sans fond à utilisation multiple en remplacement des sachets, d'un substrat de croissance constitué de compost de matière verte à base de broyat d'Acacia largement disponible en Tunisie.

Pour les 16 pépinières modernisées, la production selon la technique hors sol en conteneur atteint 14 millions de semis par an. La proportion des semis produits selon cette technique gagne du terrain chaque année sur la production réalisée avec les techniques traditionnelles.

Le présent guide se veut une contribution et un appui à l'effort entrepris par l'Administration Forestière dans l'amélioration des méthodes de production de semis forestiers de qualité nécessaire à l'atteinte des objectifs stratégiques. Il s'adresse aux responsables des pépinières et des techniciens en charge des productions et aux pépiniéristes privés.

Le programme de modernisation des pépinières se poursuivra selon des modes qui peuvent faire appel aux promoteurs privés conformément à la politique du désengagement de l'État en confiant certaines activités au secteur privé. L'Administration pourrait choisir de confier une partie de la production de semis forestiers destinés aux besoins de l'État à des promoteurs ou opérateurs privés compétents. Alors ce guide pourra contribuer à leur transmettre les connaissances développées par les professionnels de l'État.

Mohamed Habib HADDAD
Ministre de l'Agriculture et des
Ressources Hydrauliques



Remerciements

Pampev Internationale voudrait adresser des remerciements à tous ceux et celles qui ont contribué à la réalisation du projet de modernisation des pépinières forestières en Tunisie et à la réalisation de ce Guide pratique de production en hors sol de plants forestiers, pastoraux et ornementaux en Tunisie.

Des remerciements particuliers s'adressent au personnel des pépinières modernisées pour leur effort et leur travail au cours des dernières années, à Monsieur le Directeur Général des Forêts, à Rafik Aini et à Ghazi Gader, ainsi qu'à tous les responsables et techniciens tunisiens qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce guide.

Il est important de souligner la contribution exceptionnelle du Dr. Mohammed Lamhamedi, chercheur à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, chercheur associé au Centre de recherche en biologie forestière de l'Université Laval et professeur associé à la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval. Son expertise et ses travaux dans le domaine des pépinières forestières ont permis que ce document soit à la fine pointe de l'état des connaissances dans ce domaine.

Nous tenons aussi à adresser nos vifs remerciements à notre partenaire en Tunisie, M. Salem Bouzid (SSB), pour son aide précieuse, sa collaboration professionnelle et pour sa grande hospitalité.

Nos remerciements s'adressent également à tous les organismes (l'Agence Canadienne de Développement Internationale et la Direction Générale des Forêts de Tunisie) qui ont appuyé ce projet durant les différentes phases de sa réalisation.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1

Historique des reboisements et stratégies de modernisation

| | |
|---|----------|
| des pépinières forestières en Tunisie | 1 |
| Introduction | 1 |
| 1. Évolution des pépinières forestières et stratégies de modernisation..... | 1 |
| 2 Évolution des principales techniques de production de plants..... | 4 |
| 3 Importance de la production de plants et des surfaces reboisées..... | 4 |
| Conclusion | 8 |

Chapitre 2

Installation et gestion des pépinières forestières modernes en Tunisie

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 9 |
| 1. Installation de la pépinière..... | 9 |
| 1.1 Choix du site | 9 |
| 1.2 Choix des infrastructures et des équipements | 9 |
| 2. Gestion de la pépinière | 10 |
| 2.1 Objectifs | 10 |
| 2.2. Planification de la campagne..... | 11 |
| 2.3 Gestion des opérations | 13 |
| 2.4 Suivis et contrôles..... | 22 |
| 2.5 Travaux d'entretien des infrastructures..... | 23 |
| 2.6 Rapport annuel d'activités | 26 |

Chapitre 3

Compostage et substrat de croissance.....

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 27 |
| 1. Fondements théoriques | 28 |
| 1.1 Définition du compostage..... | 28 |
| 1.2 Paramètres du compostage | 28 |
| 2 Fondement pratique du compostage | 38 |
| 2.1 Approvisionnement en biomasse..... | 32 |
| 2.2. Préparation pour le compostage | 33 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3. | Broyage du Matériel..... | 35 |
| 4. | Mise en andain et utilisation du nitrate d'ammonium..... | 35 |
| 5. | Retournement des andains | 35 |
| 6. | Test de Maturité | 36 |
| 7. | Test de porosité | 37 |
| 7.1 | Évaluation de la porosité du compost ou du substrat..... | 38 |
| 7.2 | Mélange pour le substrat de croissance | 38 |
| | Conclusion | 39 |

Chapitre 4

| | | |
|-----|---|-----------|
| | Irrigation des plants..... | 41 |
| 1. | Ressources en eau..... | 41 |
| 2. | Besoins en eau selon les stades de croissance..... | 42 |
| 2.1 | Phase de germination..... | 42 |
| 2.2 | Phase de croissance active..... | 42 |
| 2.3 | Phase d'endurcissement | 42 |
| 3. | Effets du stress hydrique sur la croissance et la physiologie des plants (zones semi-arides).42 | |
| 4. | Effets d'excès d'eau sur la croissance et la physiologie des plants..... | 43 |
| 5. | Méthodes de contrôle de l'irrigation en pépinière..... | 43 |
| 5.1 | Méthode gravimétrique : la méthode la plus utilisée..... | 44 |
| 5.2 | Méthode par chambre à pression..... | 45 |
| 5.3 | Méthode appareil MP-917 (réflectométrie dans le domaine temporel)..... | 45 |
| 5.4 | Méthode tactile jumelée à l'expérience du jardinier..... | 45 |
| | Conclusion..... | 45 |

Chapitre 5

| | | |
|----|--|-----------|
| | Fertilisation en pépinière forestière | 47 |
| | Introduction..... | 47 |
| 1. | Principaux facteurs affectant la disponibilité des éléments minéraux | 47 |
| 2. | Éléments nutritifs essentiels et modalités de diagnostic | 47 |
| 3. | Caractéristiques des fertilisants..... | 50 |

| | | |
|----|--|-----------|
| 4. | Qualité de l'eau d'irrigation et déficience en fer | 51 |
| 5. | Exemple de calcul des quantités de fertilisants | 52 |
| 6. | Contrôle de la fertilisation | 54 |
| | Conclusion | 55 |

Chapitre 6

Mise en pratique de l'inoculation ectomycorhizienne

dans les pépinières modernes en Tunisie.....57

| | | |
|-----|--|-----------|
| | Introduction..... | 57 |
| 1. | Principales formes d'associations mycorhiziennes..... | 58 |
| 1.1 | Les endomycorhizes..... | 58 |
| 1.2 | Les ectomycorhizes..... | 58 |
| 1.2 | Les ectendomycorhizes | 59 |
| 2. | Avantages de la mycorhization | 59 |
| 2.1 | Meilleure amélioration de la capacité d'absorption..... | 59 |
| 2.2 | Meilleure protection contre les stress biotiques et abiotiques..... | 60 |
| 2.3 | Production de substances de croissance végétale..... | 60 |
| 2.4 | Coût énergétique des mycorhizes et leur nécessité pour la plante | 60 |
| 3. | Inoculation des plants | 61 |
| 3.1 | Principales méthodes d'inoculation | 61 |
| 3.2 | Résultats de l'inoculation des plants en pépinière..... | 62 |
| | Conclusion | 64 |

Chapitre 7

Qualité des plants forestiers et performance en site de reboisement65

| | | |
|-----|---|-----------|
| | Introduction..... | 65 |
| 1 | Principaux objectifs de l'évaluation de la qualité des plants forestiers..... | 65 |
| 2. | Variables morphologiques et physiologiques de qualification des plants | 67 |
| 2.1 | Variables morphologiques | 67 |
| 2.2 | Variables physiologiques | 69 |
| 3. | Principales normes de qualification des plants utilisées à l'échelle opérationnelle | 71 |
| 4. | Principales améliorations à apporter à la filière de production de plants | 73 |
| | Conclusion | 73 |

Chapitre 8

| | |
|---|-----------|
| Stratégie de développement, de modernisation et de privatisation des pépinières forestières en Tunisie | 75 |
| Introduction..... | 75 |
| 1. Historique | 75 |
| 2. La problématique..... | 75 |
| 3. Les expériences de privatisation du secteur de production de plants forestiers | 76 |
| 3.1 Province de la Colombie Britannique au Canada | 76 |
| 3.2 Province de Québec au Canada | 76 |
| 4. Les options de privatisation | 77 |
| 4.1 Achat de plants seulement | 77 |
| 4.2 Achat de plants et fourniture de semences | 77 |
| 4.3 Achat de plants et fourniture de semences et des conteneurs | 77 |
| 4.4 Fourniture de services conseils à la production de plants | 78 |
| 4.5 Fournitures des infrastructures de production | 78 |
| 5. Stratégie de privatisation..... | 78 |
| Conclusion | 79 |
| Conclusion Générale..... | 81 |
| Références bibliographiques..... | 83 |

Annexes

1. État des pépinières forestières et pastorales en Tunisie
2. Suivi de qualité de l'empotage.
3. Suivi de la qualité de l'ensemencement.
4. Suivi des applications de pesticides
5. Suivi de croissance des plants
6. Paramètres à analyser pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation
7. Inspection phytosanitaire et malherbologique
8. Registre des données d'arrosage
9. Normes de qualité des eaux d'irrigation en pépinière forestière
- 10.A Chartes pour l'évaluation des pourcentages d'humidité dans le substrat des conteneurs (15-340)
- 10.B Chartes pour l'évaluation des taux d'humidité V/V dans le substrat des conteneurs (15-340)
11. Charte d'arrosage
12. Rappel de quelques notions spécifiques à la fertilisation
13. Exemple de calculs : Pépinière de Oued El Bir

Chapitre 1

Historique des reboisements et stratégies de modernisation des pépinières forestières en Tunisie

Introduction

Soucieuse de la protection de l'environnement et de la conservation de la productivité des sols, la Tunisie a toujours adopté une politique de reboisement spécifique à la reconstitution du couvert forestier dégradé, à la lutte contre l'érosion des sols, l'ensablement et la désertification, et à la protection des bassins versants ainsi qu'à l'amélioration de la production forestière en vue de diminuer le déficit de la balance commerciale des produits ligneux.

En 2004, les différentes ressources forestières et pastorales couvraient une superficie de 1 210 000 ha, soit un taux de couverture de 12,10 %. Dans le cadre de la stratégie nationale de développement des forêts et des parcours, le dixième plan de développement tunisien (2002-2006) prévoit l'atteinte d'un taux de couvert végétal de 16 % en 2011.

Les superficies reboisées, ainsi que l'installation de nouvelles pépinières forestières permanentes, n'ont connu un essor important qu'après l'indépendance de la Tunisie en 1956. En effet, bien que l'administration forestière tunisienne ait été créée en 1884, les superficies reboisées durant la période coloniale étaient très modestes et n'ont pas dépassé 30 000 ha. La production de plants forestiers durant cette période était assurée par 15 pépinières forestières. Durant la période qui s'étale entre 1990 et 2004 pendant laquelle les statistiques nationales sont fiables, les plantations forestières couvraient 327 000 ha répartis dans les différents gouvernorats.

Actuellement, la Tunisie dispose de 103 pépinières forestières. De ce nombre deux sont volantes, 16 sont modernisées, et le reste est constitué par des pépinières permanentes qui utilisent des techniques traditionnelles de production de plants. L'installation de nouvelles pépinières et le reboisement de nouvelles superficies ont varié selon les stratégies adoptées par le gouvernement tunisien dans chaque plan de développement. En effet, l'élaboration d'un plan national de reboisement, de lutte contre la désertification et de protection des sols, mis en œuvre depuis 1991, a marqué un tournant décisif en matière d'introduction de nouvelles technologies de production de plants et de modernisation des

pépinières forestières, ainsi que pour l'adoption de nouvelles techniques de préparation mécanique des sites à reboiser.

Pour améliorer la qualité des plants et augmenter le taux de survie des reboisements, la Tunisie a toujours mis l'accent sur l'introduction et l'adaptation de nouvelles techniques de production de plants en pépinières forestières et de plantation en site de reboisement. Ces efforts consentis en matière d'amélioration de la filière de production de plants, c'est-à-dire de la semence à la plantation, ont contribué de façon significative à l'augmentation du taux de survie des reboisements. L'évaluation effectuée en 1977 concernant le taux de survie à l'échelle nationale des reboisements, d'une superficie de 118 246 ha plantés entre 1965 et 1976, a révélé que les deux tiers de la surface reboisée ont un taux de survie inférieur à 75%. Actuellement, à l'échelle de la Tunisie, le taux de survie moyen est de 70% alors que lorsque les techniques de préparation de sol sont bonnes, combinées aux conditions climatiques favorables, ce taux de survie des plants forestiers dans certains sites peut atteindre 90% et ce, avant l'opération de regarnis.

Les principaux objectifs de ce chapitre consistent à i) cerner l'évolution et la stratégie de modernisation progressive des pépinières forestières; ii) décrire de façon générale l'évolution des principales techniques utilisées pour la production de plants; et iii) faire ressortir l'importance des surfaces reboisées et des quantités de plants produits en pépinières forestières.

1. Évolution des pépinières forestières et stratégies de modernisation

En Tunisie, la première pépinière forestière permanente de Grombalia a été créée en 1937. Lors de la période coloniale, la Tunisie ne disposait que de 15 pépinières forestières (tableau 1.1). Après l'indépendance et durant la période qui s'étale entre 1956 et 1960, la Tunisie a connu une phase d'édification de 23 nouvelles pépinières forestières. Cette étape a été suivie par une longue période (1961-1981) où le nombre de pépinières nouvellement installées n'a pas dépassé 19 pépinières.

L'adoption du 6ème plan de développement relatif à la période 1982-1986 a permis la création de 18 nouvelles pépinières forestières. La première phase (1988-1992) et la deuxième phase (1995-1999) du projet de développement forestier (PDF I et PDF II) ont permis l'installation de 24 pépinières, ainsi que le démarrage d'un projet pilote de modernisation de trois pépinières forestières (Oued El Bir, Ouechtata et Sers). Chaque pépinière forestière a été dotée d'infrastructures modernes (ombrière, système de fertigation, gestion informatisée, suivi environnemental, conteneurs, substrat à base de compost) installées sur une aire de 0,3 ha pour produire 500 000 plants. Le budget alloué à la modernisation de ces trois pépinières pilotes était de 1,4 millions de dinars tunisiens (DT).

Tableau 1.1 Principales périodes affectant l'évolution du nombre de pépinières forestières permanentes et volantes en Tunisie.

| Période | Nombre de nouvelles pépinières | Cumul du nombre de pépinières |
|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Période coloniale | 15 | 15 |
| 1956-1960 | 23 | 38 |
| 1961-1964 | 8 | 46 |
| 1965-1968 | 2 | 48 |
| 1969-1972 | 2 | 50 |
| 1973-1976 | 0 | 50 |
| 1977-1981 | 7 | 57 |
| 1982-1986 | 18 | 75 |
| 1987-1991 | 10 | 85 |
| 1992-1996 | 17 | 102 |
| 1997-2004 | 1 | 103 |

Source DGF

Les excellents résultats obtenus lors de cette première phase de modernisation en matière de production de plants de qualité ont encouragé les responsables de la Direction Générale des Forêts (Tunisie) à élaborer un plan de développement des pépinières forestières et pastorales en vue de poursuivre cet effort de modernisation. Ce plan de développement a permis de définir une classification préliminaire des 101 pépinières permanentes et des deux pépinières volantes en vue d'assurer une bonne répartition spatiale et de favoriser l'émergence de pépinières principales qui

assureront la production de plants à l'échelle de chaque gouvernorat.

La typologie de ces pépinières a tenu compte des principales contraintes (débit et qualité de l'eau, électrification, disponibilité de la biomasse compostable, frais de gestion, main-d'œuvre, capacité de production et possibilités d'extension) spécifiques à chaque pépinière. Cette classification a permis de déterminer le degré d'investissement à réaliser dans l'avenir, l'objectif final étant d'identifier les pépinières susceptibles d'être modernisées, en vue d'assurer les besoins du pays en plants forestiers, pastoraux et ornementaux.

Les pépinières ont été classées en trois catégories (annexe 1): A - Pépinière de première importance sans contrainte, dont la réhabilitation à court terme est obligatoire; B - Pépinière de seconde importance dont l'utilisation est certaine dans l'avenir et qui nécessite une réhabilitation à moyen terme; C - Pépinière à contraintes majeures et ayant des frais de gestion élevés, dont la fermeture se fera au fur et à mesure de la progression de la modernisation des pépinières des deux catégories précédentes.

Dans une deuxième phase (1997-2001), la Tunisie a consenti des efforts louables en matière d'investissement dans le secteur forestier et de modernisation de plusieurs nouvelles pépinières forestières.

En 1997, six pépinières forestières (Bousalem, Gaafour, El Azib, Sousse, Kasserine et Zaghouan) ont été modernisées en vue de produire un million de plants dans chacune de ces pépinières. L'enveloppe budgétaire allouée à la modernisation de ces six pépinières a atteint 6 millions DT.

En 2000, une attention particulière a été accordée à l'agrandissement des trois premières pépinières forestières, modernisées en 1995, pour augmenter la capacité de production à un million de plants par pépinière. Cet agrandissement a nécessité un investissement de 916 500 DT. De plus, trois autres pépinières (Guelta Safra, El Grine et Tamra) ont été modernisées à un coût global de 2,5 millions DT.

2. Évolution des principales techniques de production de plants

En Tunisie, les techniques de production de plants en pépinière forestière ont subi des modifications majeures depuis l'installation des premières pépinières en 1937 jusqu'à la modernisation actuelle de ce secteur dès 1995. Ces modifications et ces améliorations apportées aux techniques de production de plants en pépinière avaient pour objectif d'améliorer la qualité des plants, le taux de survie et la performance en site de reboisement. L'évolution de ces techniques, ainsi que leur impact sur la qualité des plants sont décrits de façon détaillée par Lamhamedi et al. (2000). Les principales techniques de production de plants en pépinière forestière ont évolué comme suit :

- Utilisation du mode de production de plants à racines nues jusqu'au début des années 50 et son remplacement par les pots en argile cuite (photo 1.1.a). Cette dernière approche a été utilisée jusqu'au début des années 60 pour assurer une bonne partie de la production de plants;
- Introduction et généralisation de l'utilisation du mode de production de plants en sachet de polyéthylène durant la période 1960-70. Les sachets sont remplis généralement par du terreau forestier et placés dans des planches creusées en contact direct avec le sol (photo 1.1.b) en absence de tout système de drainage;
- Utilisation des planches cimentées dans certaines pépinières en vue d'assurer un bon drainage et de limiter l'envahissement des plants forestiers par les mauvaises herbes (photo 1.1.c). Cette approche a été adoptée par plusieurs pépinières dans le cadre de la première phase du projet de développement forestier (PDF I; 1988-1992);
- Modernisation progressive de 16 pépinières forestières (photo 1.1.d) durant la période 1995-2001 en introduisant et en adaptant de nouvelles technologies de production de plants forestiers (standardisation du substrat de croissance à base de compost, ombrière, conteneurs, irrigation automatique, mycorhization, fertilisation, gestion informatisée, suivi des variables environnementales, etc..).

3. Importance de la production de plants et des surfaces reboisées

Depuis le début des travaux de reboisement en 1904, l'emphase a été mise sur la protection des oasis, la fixation des dunes littorales, la protection des barrages, l'amélioration des parcours, les plantations routières et récréatives, l'enrichissement artificiel dans le cadre de l'aménagement des forêts naturelles et l'installation de plantations de production. Ces plantations diversifiées avaient pour objectif principal de compléter le rôle des forêts naturelles en matière de protection, de production et de récréation. À l'échelle nationale, entre 1990 et 2004, les plantations uniquement forestières couvrent 327 000 ha. La répartition de ces reboisements entre les gouvernorats est indiquée dans la figure 1.2. Les principaux reboisements de production ont été réalisés dans les gouvernorats du Nord et du Centre-ouest. De plus, chaque année, les plants pastoraux mis en terre couvrent en moyenne entre 10 000 et 15 000 ha.

Durant la période 1989-2004, la production totale des plants forestiers et pastoraux a atteint 683 millions de plants dont la répartition par gouvernorat est indiquée dans la figure 1.3. Pour cette même période, la production nationale moyenne annuelle de plants pastoraux et forestiers dépasse 40 millions de plants.

En Tunisie, selon la problématique et les besoins locaux ou régionaux, certaines pépinières produisent plus de plants de peupliers, d'ornement, pastoraux, forestiers ou spécifiques à la fixation des dunes maritimes ou continentales.

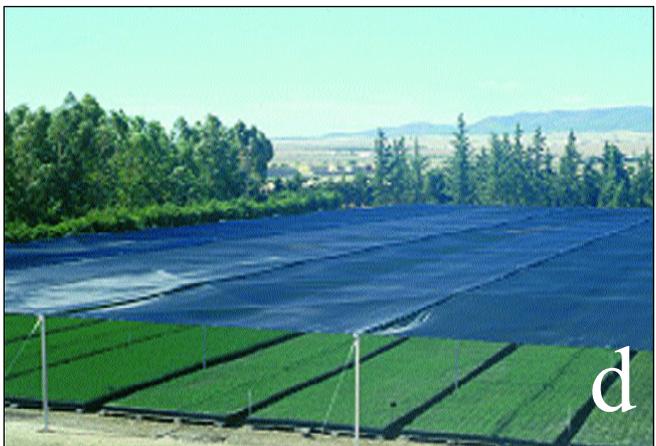
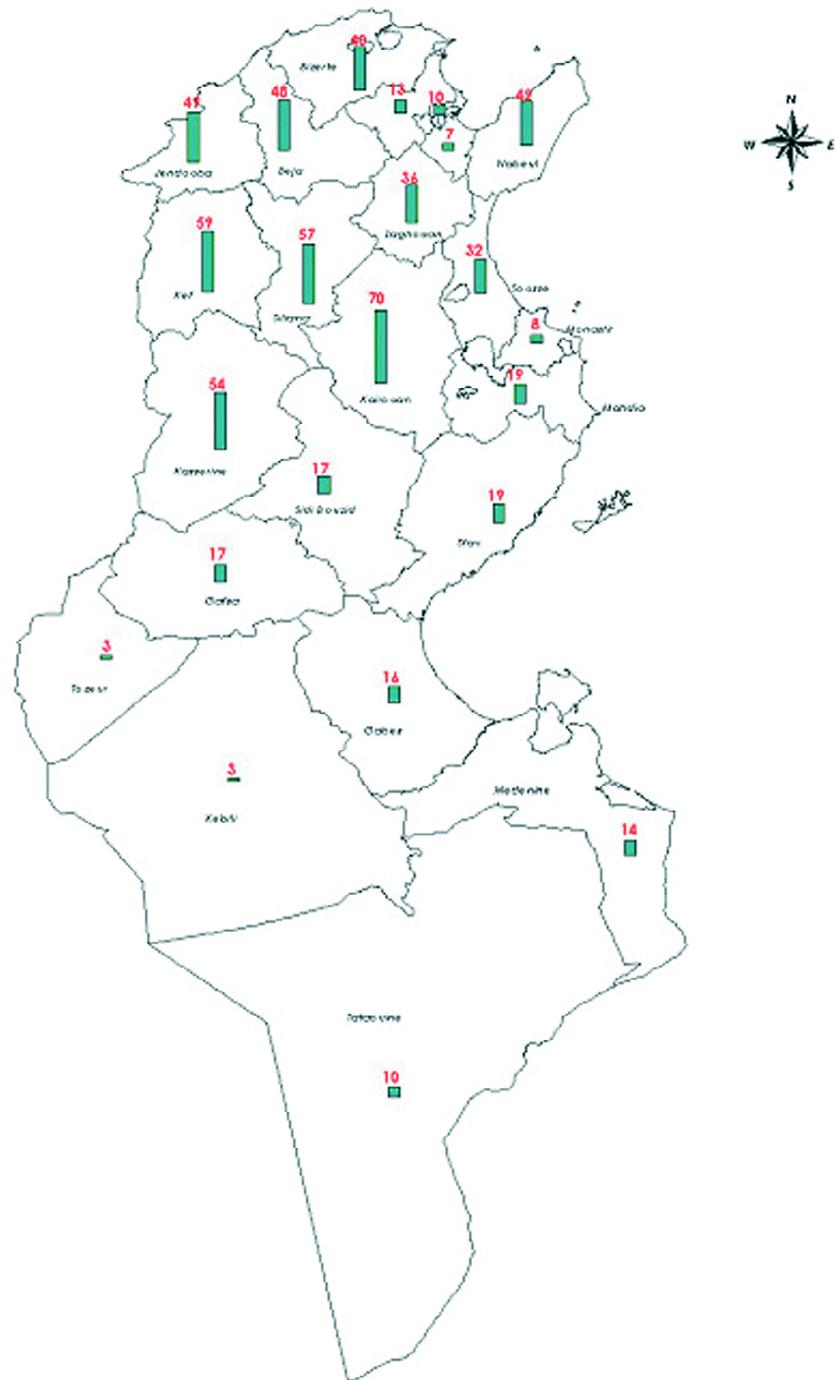


Photo 1.1. Evolution des techniques de production da plants dans les pépenières en Tunisie :

- a) Pots en argile cuite,
- b) Sachets de polyéthylènes,
- c) Planches cimentées
- d) Utilisation des techniques modernes de production de plants

(Clichés: Lamhamedi & Fecteau)



© G. Gader - Jan 2005

Figure 1.3. Production de plants forestiers et pastoraux (millions de plants) par Gouvernorat entre 1989 et 2004

Conclusion

Soucieuse de son développement durable, la Tunisie a toujours accordé une grande importance à l'amélioration des techniques de production de plants en pépinières forestières et à l'élaboration de programmes de reboisement ambitieux. Les plants forestiers produits dans les différentes pépinières contribuent de façon significative à l'atteinte des objectifs de ces différents programmes, notamment ceux spécifiques à l'amélioration pastorale, à la conservation et à la

protection des sols et à la lutte contre la désertification et l'ensablement continental et maritime.

La stratégie de modernisation progressive des pépinières forestières et l'utilisation de techniques modernes adaptées aux conditions tunisiennes constitue une approche originale. Elle peut servir comme modèle de développement du secteur des pépinières forestières. Sa généralisation est très prometteuse surtout pour les pays aux situations comparables à celle de la Tunisie.

Chapitre 2

Installation et gestion des pépinières forestières modernes en Tunisie

Introduction

L'installation des infrastructures est la première étape de l'implantation des pépinières forestières modernes. La bonne planification et l'évaluation des besoins sont les gages de réussite d'un tel projet. Cette section du guide éclairera les décideurs dans le choix des différents équipements de pépinière selon le climat, les besoins locaux et la nature des opérations. De plus, les outils de gestion de la pépinière moderne seront présentés en détails. Ces outils permettront une meilleure planification des tâches et des opérations en pépinière, ainsi qu'une meilleure estimation des besoins en main-d'œuvre, en équipements et en intrants. Les différents suivis de culture font partie des outils de production présentés dans cette section.

1. Installation de la pépinière

1.1 Choix du site

Le choix du site pour l'installation d'une pépinière doit répondre à plusieurs critères. La région choisie doit posséder un micro-climat chaud mais sans températures extrêmes et une faible probabilité d'orage ou de grêle. Le terrain doit être bien drainé, plat ou en pente légère, avec un sol sableux et non-rocailleux. Le sol doit aussi offrir une bonne stabilité pour permettre l'installation de fondations et la circulation de la machinerie en tout temps.

Le site doit avoir une disponibilité adéquate en eau de qualité et être alimenté en électricité. La superficie doit être suffisante pour installer les infrastructures, les aires de travail, de stockage et de circulation, et permettre une future expansion si les besoins venaient qu'à changer. Il faut prévoir deux fois la surface du niveau de production initial. La localisation devrait être stratégique, offrir une bonne accessibilité routière toute l'année et la proximité d'un bassin de main-d'œuvre de qualité. La proximité des sites de reboisement est aussi un grand avantage.

1.2 Choix des infrastructures et des équipements

Sous le climat sud-méditerranéen, un dispositif d'ombrière installé à une hauteur de trois mètres équipé

d'un système automatisé d'arrosage et de fertilisation est recommandé. La toile ombrière est un filet tissé composé de fils de polyéthylène plats ou ronds à grande densité et traités contre la dégradation causée par les rayons ultras-violet du soleil. Elle possède un degré d'ombrage de 50%. L'ombrage à 50 % a été préféré afin de représenter le plus possible les conditions d'ensoleillement en sous-bois. De plus, ce pourcentage d'ombrage est bien adapté pour les différentes espèces pouvant être produites en pépinière tunisienne.

Le système d'arrosage est alimenté à partir d'une réserve d'eau. Une électro-pompe achemine l'eau dans un réseau de tuyaux souterrains en PVC. L'eau est distribuée aux plants par des asperseurs équidistants. Ce système permet d'utiliser moins d'eau que le système d'arrosage utilisé en pépinière traditionnelle et de maximiser l'homogénéité de l'arrosage (figure 2.1).

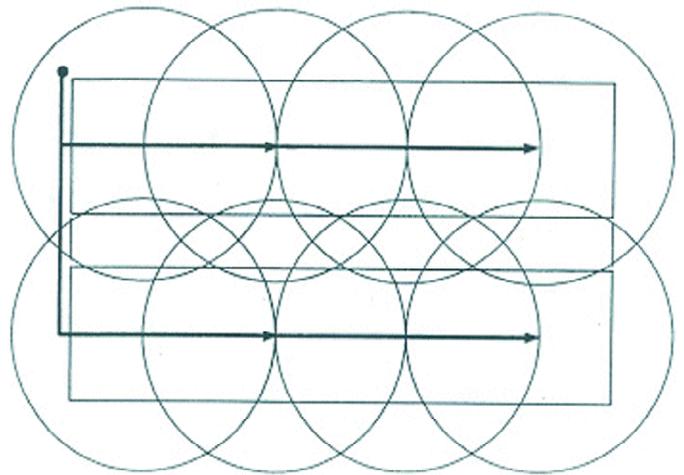


Figure 2.1. Patron d'irrigation d'un système par asperseur

Le système d'arrosage doit être toujours doté de filtres pour enlever les éléments en suspension dans l'eau (particules de sol, graines de mauvaises herbes). Un injecteur d'engrais soluble permet d'appliquer les fertilisants par les asperseurs (fertigation).

Un broyeur motorisé est utilisé pour fabriquer le compost d'acacia qui sera la base du substrat de culture. Des équipements complémentaires tels que convoyeurs motorisés, tamis et bétonnière (utilisé pour mélanger les substrats) sont aussi utilisés pour la préparation du substrat.

La production de plants hors-sol se fait dans des conteneurs en polyéthylène haute densité regroupant plusieurs cavités. Ils ont une durée de vie de plusieurs années (photo 2.1).

Pendant la saison de croissance, les conteneurs sont surélevés sur des tables de culture pour permettre un cernage aérien des racines. L'acquisition d'une chaîne d'empotage et d'ensemencement mécanisée permet d'augmenter la vitesse d'exécution des opérations.



Photo 2.1:a) Formation des apex racinaires suite à l'utilisation des conteneurs à fond ouvert et des tables de culture surélevées. b) Utilisation des tables de culture surélevées pour favoriser le cernage aérien des racines. (Cliché Bertrand Fecteau)



1.2.1 Installation

La localisation des infrastructures comme le bureau administratif, les bâtiments de service, les voies d'accès, les ombrières, la réserve d'eau, les électro-pompes et le système d'irrigation doit être soigneusement planifiée. Des haies brise-vent devraient être plantées pour protéger les infrastructures et créer un micro-climat favorable à la croissance des plants. Les brises-vent doivent être relativement éloignés pour ne pas ombrager les cultures.

Le terrain qui recevra les infrastructures des ombrières doit être nivelé (pente entre 0 et 1%) pour faciliter le déroulement de la culture, les déplacements des équipements et de la main-d'œuvre, et la livraison des plants. La pente du terrain doit faciliter l'écoulement des eaux d'irrigation excédentaires et des pluies. Dans l'éventualité où les sources de matières vertes comme l'Acacia cyanophylla sont inexistantes ou trop éloignées, il faut prévoir une surface pour des plantations en plein sol qui serviront à la fabrication du compost. Ces plantations sont d'une grande importance dans les pépinières situées dans les régions où les besoins en biomasse compostable ne sont pas satisfaits à long terme.

1.2.2 Montage des infrastructures

Une dalle de béton pour le compostage doit être construite avec une légère pente pour éviter l'accumulation des eaux excédentaires. La surface de cette dalle de béton armée doit non seulement pouvoir recevoir le volume total de compost, mais aussi permettre de réaliser facilement le broyage et les retournements.

Les toiles des ombrières doivent être solidement fixées afin de bien résister aux intempéries. Le béton contenu dans les ancrages ne doit pas être ménagé lors de la construction. L'ajustement de la tension des câbles d'acier est très important au départ et doit être corrigé régulièrement.

Les installations doivent être finalisées quelques semaines avant les ensemencements afin que le personnel se familiarise avec ces nouveaux équipements.

2. Gestion de la pépinière

2.1 Objectifs

Le gestionnaire devra fixer des objectifs clairs au niveau des productions, du personnel, des coûts ou de tout autre paramètre. De plus, les objectifs doivent être bien connus et largement diffusés afin de diriger tous les efforts dans la même direction.

Ces objectifs peuvent être exprimés qualitativement ou quantitativement. Ils doivent aussi être réalistes, c'est-à-dire permettre la conciliation entre les besoins

des plants, le souci d'accroître la productivité, l'intérêt à réduire les coûts et la prise en compte des éléments de la problématique locale.

2.2. Planification de la campagne

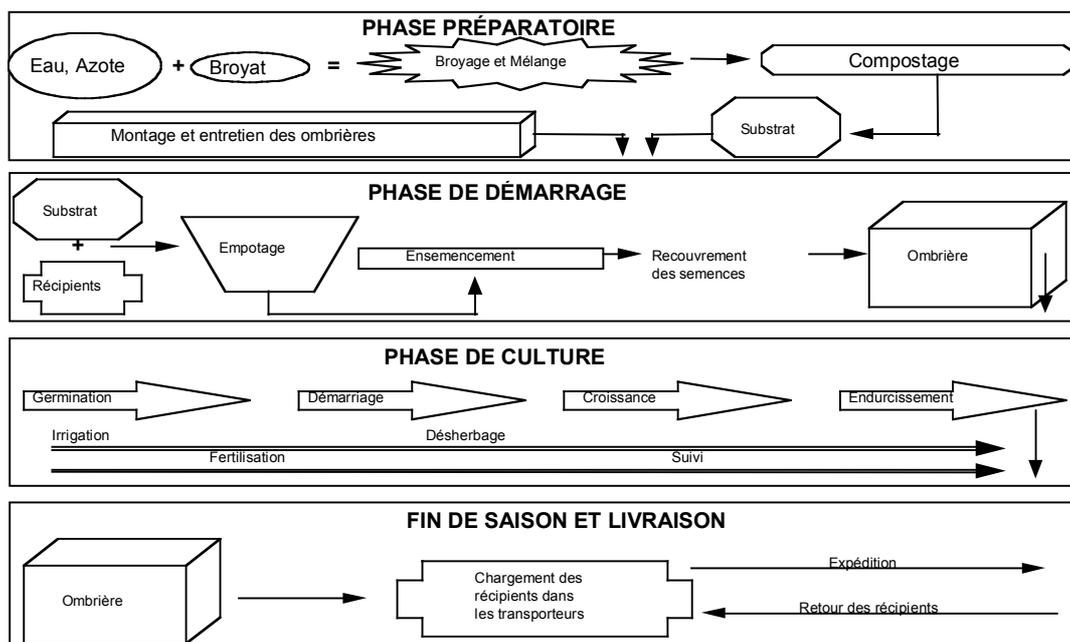
La planification consiste à déterminer les moyens qui seront mis de l'avant pour atteindre les objectifs. Pour ce faire, le gestionnaire doit posséder une vision globale car le choix de ces moyens se base sur des prévisions ou des indicateurs de performance et tient compte des contraintes. Les outils, les méthodes ainsi que le besoin en personnel sont ainsi fixés. Enfin, un échéancier précis doit être arrêté en identifiant les problèmes potentiels et les phases critiques.

Le pépiniériste se doit de bien comprendre et visualiser les étapes charnières de la production. Pour ce faire, certains schémas permettent de voir rapidement les implications des fortes périodes comme celle de l'ensemencement. La figure 2.2 nous donne un exemple d'un schéma qui divise le cycle de production en quatre

grands moments. La phase préparation précède l'exécution de la phase démarrage qui représente un moment intense: l'ensemencement. Vient ensuite la phase de culture qui se caractérise par le temps, la patience, l'observation, le suivi et la rigueur. Au terme de la phase de culture, il y a la concrétisation de l'objectif poursuivi, c'est-à-dire la livraison de plants de qualité au moment attendu.

Le programme d'ensemencement de la prochaine campagne est le principal document de base de planification des outils et des méthodes. À partir des volumes à ensemer, le pépiniériste prévoit les volumes de substrat nécessaire ainsi que les besoins en matériaux et équipements. Les quantités d'engrais et de pesticides sont calculées avec une marge de sécurité d'environ 15% au moins afin de pallier aux imprévus.

Figure 2.2 Schéma organisationnel des quatre grandes étapes du cycle de production.



Tout pesticide doit être entreposé dans un lieu où les conditions ambiantes, notamment la température, l'humidité ou les précipitations ne sont pas susceptibles d'altérer le pesticide, son contenant ou son étiquette. Il doit également être entreposé de manière à ne pas laisser son contenu se répandre dans l'environnement. De plus, l'utilisation de ces produits doit être effectuée de façon sécuritaire pour les ouvriers et l'environnement. L'ensemble des travailleurs utilisant des pesticides doivent impérativement être informés sur

l'utilisation et l'entreposage sécuritaire de ces produits. Le gestionnaire doit élaborer un calendrier prévisionnel des activités où les périodes d'exécution des opérations sont indiquées (figure 2.3). Il est aussi utile d'insérer dans ce même calendrier les estimations de besoins en main-d'œuvre. Le rapport d'activités de la campagne précédente sert de base pour ce travail. Le plan de localisation des plants sous l'ombrière devra être bien réfléchi afin que les espèces ayant les mêmes besoins cultureux aient été regroupées sur l'aire de culture.

Figure 2.3 Exemple d'un calendrier prévisionnel de production dans une pépinière moderne en Tunisie

| OPÉRATION | Janv | | Fév | | Mars | | Avril | | Mai | | Juin | | Juillet | | Août | | Sept | | Oct | | Nov | | Déc | |
|--|------|----|-----|----|------|----|-------|----|-----|----|------|----|---------|----|------|----|------|----|-----|----|-----|----|-----|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S1 | S2 | S3 | S4 | S1 | S2 | S3 | S4 | S1 | S2 | S3 | S4 | S1 | S2 | S3 | S4 | S1 | S2 | S3 | S4 |
| Préparation de la campagne lavage des récipients test de germination des semences | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Préparation du compost récolte et broyage de la biomasse suivi et retournement des andains | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ensemencement mélange du substrat remplissage des conteneurs ensemencement application de la silice mise en place des conteneurs | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Démariage et repiquage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Entretien des cultures arrosage et fertilisation traitement phytosanitaire désherbage enlèvement des ombrières | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Suivi des cultures suivi de croissance inspections phytosanitaires | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rapport annuel | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

2.3 Gestion des opérations

2.3.1 Opération d'empotage et d'ensemencement

2.3.1.1 Nature des graines utilisées

Dans le cadre d'une campagne de production, la date d'ensemencement et la qualité des graines utilisées sont des facteurs déterminant pour assurer la réussite. Les semences doivent être entreposées au sec et au frais durant toute la durée de la période de semis. Le pourcentage de germination de chacun des lots doit être connu dès leur réception. Un taux élevé de germination facilitera le travail du pépiniériste et diminuera sans doute le coût des opérations spécifiques au repiquage des plants. Ce test de germination doit avoir été effectué moins d'une année à l'avance.

De plus, la pureté du lot de semences doit être maximale. Il ne faudra pas hésiter à nettoyer un lot qui contiendrait trop d'impuretés (semences vides, ailes, écailles de cônes, etc.)

Les lots de semences observés dans les pépinières possèdent en général une pureté satisfaisante. Certains lots de sources locales doivent être nettoyés avant leur utilisation. Les résultats des tests de germination doivent être mentionnés lors de la livraison des graines en pépinière.

Une autre information importante est la densité des semences, c'est-à-dire leur nombre par kilogramme. Cette information permet de vérifier en cours d'ensemencement si la quantité résiduelle du poids des graines est suffisante pour respecter le programme.

2.3.1.2 Test simple de germination

Ce test peut s'avérer nécessaire si des lots de graines n'ont pas été testés par le fournisseur ou pour évaluer des lots résiduels de la campagne précédente.

a / État du lot de semences

Le contrôle de la pureté permet de déterminer la proportion d'impuretés (aiguilles, écailles de cônes, ailes, bractées, etc.) qu'un lot contient.

À partir d'un échantillon représentatif du lot, la méthode consiste à séparer à la main les semences des impuretés (examiner au moins 2 500 semences). Ensuite, on pèse chacun des composants et on évalue la proportion que représentent les impuretés.

Parfois, il sera nécessaire de tamiser à nouveau les lots à cause du manque de pureté.

b / Échantillons d'analyse

Pour constituer un échantillon représentatif de graines pour l'analyse, il faut prélever au hasard de petites quantités de graines à différents endroits dans le lot concerné.

Les échantillons primaires sont ensuite mélangés pour former l'échantillon composite, dans lequel on prélève au hasard la quantité nécessaire de graines pour former l'échantillon d'analyse.

c / Détermination de la masse des semences

La méthode pour déterminer leur nombre au kilogramme consiste à peser 8 lots de 100 semences chacun.

d / Évaluation de la faculté germinative

L'évaluation de la faculté germinative, ou pourcentage de germination, permet au pépiniériste d'évaluer la quantité de semences qui devront être appliquées dans chacune des cavités afin de s'approcher le plus possible d'un plant germé par cavité.

La méthode d'analyse de la faculté germinative exige normalement des conditions en laboratoire (normes de l'Association internationale d'essais de semences, ISTA 1993).

Tableau 2.1

Nombre de semences à semer en fonction du pourcentage de germination des graines
(Pourcentage de cavités vides accepté : 1 à 1.5%)

| Pourcentage de germination des graines | Nombre de semences par cavité |
|--|-------------------------------|
| 95 et + | 2 |
| 90 | 2 |
| 85 | 3 |
| 80 | 3 |
| 75 | 3 |
| 70 | 4 |
| 65 | 4 |
| 60 | 5 |
| 55 | 6 |
| 50 | 6 ou 7 |
| 45 | 8 |
| 40 | 9 |
| 35 | 10 |

Toutefois, en pépinière, certains tests moins rigoureux pourront suffire aux besoins (test de sûreté). Le matériel nécessaire est : des boîtes de germination (plats de Pétris) très propres, substrat de germination (papier absorbant, ouate, etc.), eau déminéralisée additionnée de fongicide (faible concentration).

Chaque analyse nécessite au moins quatre sous-échantillons de 100 semences chacun provenant de la fraction pure de l'évaluation de la pureté. La température doit être maintenue entre 20 et 28 °C, plus chaud le jour, et l'humidité relative maintenue à 99 %.

La durée du test de germination ne dépasse pas 30 jours en général. Le dénombrement des semences germées se fait idéalement à tous les jours sur des fiches où se retrouve l'ensemble des informations concernant le test (identification du lot, date de germination, nombre de semences testées, nom de l'observateur, nombre de semences germées à chaque jour...).

Il vaut mieux effectuer les tests juste avant les ensemencements. Le pourcentage de germination ne considère que la germination totale. Il s'évalue en calculant le

nombre total de graines germées en fonction du nombre total de graines qui faisaient partie de l'échantillon :

Pourcentage de germination : Nombre de semences germées multiplié par 100 et divisé par le nombre de semences totales.

Grâce au pourcentage de germination obtenue, le pépiniériste peut évaluer le nombre de semences à semer dans les cavités. Il existe des tables permettant de connaître ces quantités en fonction des résultats du test de germination (exemple au tableau 2.1).

2.3.1.3 Empotage des conteneurs

L'opération d'empotage débute par le tamisage des différents constituants du substrat, notamment le compost d'Acacia, l'écorce broyée, etc. Selon la disponibilité des produits, certaines pépinières peuvent avoir un type de mélange différent. Mais, depuis quelques années les seize pépinières modernes de Tunisie utilisent uniquement le compost d'Acacia à cause de sa grande disponibilité d'une part, et de la rareté des autres constituants possibles d'autre part.

Si plusieurs constituants composent le substrat, ils doivent être mélangés assez longtemps pour défaire les mottes et assurer l'uniformité du substrat final. Deux méthodes sont utilisées pour mélanger le substrat, soit manuellement à l'aide de pelles, ou soit avec une bétonnière permettant un mélange plus uniforme. Les constituants peuvent être légèrement humidifiés pour limiter les problèmes de poussières.

Avant de commencer l'empotage, une vérification de la porosité du mélange est effectuée afin de s'assurer de son adéquation pour son utilisation comme substrat. Tel que discuté dans le chapitre sur le compostage, dans le climat tunisien, les proportions recommandées pour la qualité physique d'un substrat sont une macro-porosité près de 20%, une micro-porosité près de 30% et une porosité totale d'environ 50%. Le pépiniériste a intérêt à corriger le mélange si les résultats du test de porosité sont différents. En général, le problème le plus fréquent est la macro-porosité trop grande souvent due à un broyage trop grossier au départ. Dans ce cas, un nouveau broyage suivi d'un tamisage devrait corriger la situation. Nous pourrions aussi régler le problème en ajoutant au substrat un autre constituant aux particules plus fines.

Le travail de remplissage des conteneurs étant généralement fait manuellement, il est préférable de travailler au sol. Ce remplissage peut se faire à l'unité ou par groupe de conteneurs. Les deux méthodes sont utilisées et sont toutes deux bien efficaces. On peut résumer la succession des opérations comme suit :

- Remplir d'abord à moitié et ensuite secouer pour compaction ;
- Remplir complètement et se servir des doigts pour compacter légèrement les cavités surtout celles situées au coin des conteneurs ;
- Secouer une dernière fois et enlever l'excès de substrat avec la main ;
- Surveiller pour une compaction adéquate et uniforme
- L'empilement des conteneurs doit être décalé afin d'éviter une compaction excessive ;
- Faire un test de chute du conteneur, à une hauteur de près de 40 cm, pour évaluer la compaction (si la compaction est adéquate, alors il y aura un léger affaissement de 1cm).

La compaction du substrat lors du remplissage est un facteur très important. En effet, une mauvaise densité du substrat nuira au développement racinaire des plants. La compaction doit être normale et uniforme. L'erreur la plus fréquente est la faible compaction des cavités situées dans les coins des conteneurs. Les ouvriers doivent être informés de l'importance du degré de compaction qui est nécessaire dans les cavités. De plus, si la qualité du travail est bonne, le chef pépiniériste a intérêt à utiliser ces mêmes ouvriers tout au long de cette opération et même d'une année à l'autre.

Le superviseur de cette opération vérifie régulièrement la qualité de l'empotage à l'aide d'une fiche de contrôle (annexe 2). Certaines méthodes tactiles et visuelles sont suggérées pour évaluer rapidement la qualité de l'empotage, notamment :

- La pression du doigt en surface de la cavité, ce qui permet de tester l'uniformité entre les cavités ;
- L'observation sous le conteneur, ce qui permet d'identifier un mauvais remplissage ;
- La chute au sol du conteneur (environ 80 cm du sol), l'affaissement permet de juger de la compaction ;
- L'estimation du poids du conteneur, ce qui permet

d'identifier une sous ou une sur-compaction ;

- La fréquence minimale de vérification doit être aux 30 minutes.

Les principaux points à surveiller lors de l'opération d'empotage sont donc : la méthode de mélange, l'uniformité du mélange, l'humidité du mélange, la granulométrie du mélange, la densité du substrat et le niveau de remplissage. Concernant ce dernier point, le pépiniériste a intérêt à ne remplir les cavités que jusqu'à 4 mm du bord, de cette façon les semences ne se déplaceront pas facilement d'une cavité à l'autre ainsi que les racines durant la croissance.

En Tunisie, certaines pépinières (El Azib et Chott-Merriam) bénéficient d'une chaîne d'empotage et d'ensemencement mécanisée qui diminue le besoin en main d'œuvre (photo 2.2). Cet équipement améliore le rendement et augmente la vitesse de réalisation de cette opération. Les résultats obtenus seront meilleurs à condition d'avoir des ouvriers spécialisés bien formés. L'utilisation de la chaîne d'empotage et d'ensemencement nécessite un entretien rigoureux. La pépinière devra avoir un inventaire de pièces de rechange, ainsi qu'un personnel capable de prendre en charge l'entretien et la réparation.



Photo 2.2 : Exemple d'une chaîne d'empotage et d'ensemencement mécanisée présente dans certaines pépinières modernes en Tunisie :

- a) chaîne d'empotage et d'ensemencement
- b) section de balayage du surplus de substrat, formation du lit de germination et ensemencement
- c) section mélangeur à substrat, transfert du substrat par convoyeur à l'empoteuse.



2.3.1.4 Ensemencement des conteneurs

Cette opération est exécutée généralement manuellement par des ouvriers de la pépinière traditionnelle. Elle doit se faire sur une table de travail d'environ 85 cm de haut afin d'assurer le confort des ouvriers et du même coup la qualité d'exécution. Une planchette profilée en bois ou les doigts sont utilisés pour créer une légère dépression dans le substrat pour assurer que les semences soient bien centrées et enfouies à une profondeur adéquate (photo 2.3 b). Selon le taux de germination annoncé, un nombre précis de semences est déposé dans chacune des cavités. Ce nombre est très important, l'objectif étant d'obtenir une germination d'au moins une semence par cavité, avec un minimum de cavités

Photo 2.3 : Formation de la dépression dans le substrat pour l'ensemencement de la graine a) à l'aide d'un bâton ou des doigts, b) à l'aide d'une planchette en bois.



vides et un minimum de cavités occupées par plus d'un plant. C'est pourquoi le responsable de cette opération doit avoir en main le taux de germination le plus exact possible du lot de semences.

L'ensemencement manuel est une opération critique. Lorsque le diamètre des semences est très petit, comme l'eucalyptus, il est suggéré de les mélanger avec du sable et d'en semer une petite pincée par cavité. Pour les semences de grande dimension, l'ouvrier peut les enfoncer partiellement avec son doigt. Pour des semences de dimension standard, on peut construire un semoir en utilisant deux plaques minces de même dimension et possédant 15 trous en fonction du type de conteneur semé; le diamètre des trous et l'épaisseur des plaques sont fonction du diamètre des semences et du nombre à semer par cavité. Les deux plaques sont déposées directement sur le conteneur et les trous des deux plaques sont décalés. Les trous de la plaque supérieure sont remplis de semences, puis elle est déplacée pour s'aligner sur les trous de la plaque inférieure. Les semences chutent alors dans les cavités. Ce système permet de gagner un peu de vitesse et de précision.

Le choix d'ouvriers compétents et fiables est nécessaire pour la qualité d'exécution. Le respect du nombre de semences par cavité permettra d'optimiser le rendement de l'opération de démarrage, d'éviter le repiquage et le gaspillage.

Pendant l'ensemencement, il faut vérifier régulièrement le nombre résiduel de semences. Pour ce faire, la connaissance de la densité du lot est essentielle. En connaissant le nombre de conteneurs ensemencés et le nombre de kilogrammes de semences utilisées, le technicien pourra confirmer la quantité utilisée à date. Ce calcul va assurer d'atteindre l'objectif en quantité et en qualité. Si trop de semences par cavité sont semées alors le pépiniériste ne pourra atteindre son objectif ou tout au moins il va en gaspiller et augmenter les frais pour le démarrage.

D'un autre côté, si le nombre est insuffisant, alors il y aura beaucoup de cavités vides à repiquer. Le repiquage coûte très cher et son taux de succès est généralement faible. Plusieurs cavités seront vides et susceptibles d'être occupées par des mauvaises herbes. Une fois ensemencés, les conteneurs doivent être manipulés avec soin afin de ne pas déplacer les semences.

Pour les semences ayant la même couleur que le substrat, il est conseillé de les traiter avec de la poudre de talc blanche. Ce traitement rend les graines plus visibles et permet à l'ouvrier d'exécuter un travail de meilleure qualité.

L'application de sable de silice permettra de recouvrir les semences, de les maintenir en place et de les protéger durant la germination. Une silice de couleur blanche est préférable. Ce gravier de silice assure un bon drainage en surface. Il nuira à la germination de mauvaises herbes durant la campagne. Le sable de silice sec doit être tamisé afin de le débarrasser des particules dont le diamètre est inférieur à 2 millimètres. Les fines particules favorisent la formation d'une couche compacte qui peut nuire par la suite à l'infiltration de l'eau et des éléments nutritifs lors des fertilisations. En plus, la surface du substrat risque de se cimenter rapidement. Il faudra alors briser mécaniquement cette croûte. Les ouvriers doivent se protéger contre la poussière qui est dangereuse pour la santé. La silice peut aussi être lavée pour enlever cette poussière.

L'épandage manuel du sable de silice sur les conteneurs permet d'appliquer une couche de 3 à 5 millimètres d'épaisseur. L'excès de sable peut être enlevé avec une planchette et récupéré pour les conteneurs suivants. Les semences ne doivent pas être recouvertes plus de 1 à 2 fois leur diamètre. L'utilisation de sable maritime n'est pas conseillée parce qu'il peut parfois favoriser l'augmentation du pH du substrat et accentuer les risques de fonte des semis.

Les conteneurs ne doivent pas être empilés directement les uns sur les autres pour éviter de polluer la silice avec du substrat. Les lots de semences utilisés ne doivent être sortis de la chambre froide qu'en petites quantités. Les semences doivent être stockées à la pépinière dans des contenants hermétiques et au froid. À chaque fois que l'ensemencement se termine, les semences doivent être remises dans la chambre froide.

La qualité de l'opération d'ensemencement doit être vérifiée régulièrement par un superviseur à l'aide d'une fiche de contrôle. Les points à surveiller sont principalement : le nombre de semences par cavité, la profondeur et l'épaisseur du sable de silice.

L'opération d'ensemencement peut aussi être effectuée à

l'aide d'un semoir mécanisé. La vitesse et la qualité du travail sont améliorées à condition d'avoir des ouvriers spécialisés capables de bien ajuster le semoir et d'en assurer le bon entretien.

2.3.1.5 Transport des conteneurs vers l'aire de culture

Un tracteur avec remorque ou des petits chariots sont utilisés pour le transport des conteneurs semés vers l'aire de culture. Leur manipulation doit toujours se faire avec précaution et délicatesse. Il faut utiliser un élément séparateur tel qu'un film de polyéthylène ou un contreplaqué entre les étages des conteneurs empilés, sinon il y a un risque de contamination de la silice par le substrat des conteneurs situés au-dessus. Une fois semés, les conteneurs doivent être transportés sans délai sur l'aire de culture afin que les semences soient arrosées le plus vite possible.

2.3.1.6 Mise en place sur l'aire de culture

Les conteneurs sont déposés avec précaution sur les tables de culture. Chaque table est constituée d'un cadrage d'acier galvanisé capable d'en recevoir dix. Afin d'assurer un bon cernage aérien des racines, ces tables sont surélevées de 15 cm à l'aide de blocs de ciment.

L'installation de ficelles assure le bon alignement et la bonne disposition des conteneurs sous l'ombrière. La mise en place des conteneurs doit être complétée à la fin de chaque journée de travail. Ainsi, tous les plants bénéficient d'un arrosage dans le délai requis.

2.3.1.7 Chronologie de l'opération empotage & ensemencement

Les différentes opérations pour l'empotage et l'ensemencement peuvent se résumer ainsi :

- Test de germination dans le compost pour vérifier sa maturité ;
- Test de porosité du substrat pour vérifier ses qualités physiques ;

- Rebroyage ou mélange du compost d'Acacia avec d'autres constituants si nécessaire ;
- Remplissage des cavités des conteneurs avec le substrat (empotage) ;
- Préparation de la surface pour ensemencement : passage de la brosse et formation du lit de semences ;
- Ensemencement manuellement ou mécaniquement ;
- Dépôt du sable de silice manuellement ou mécaniquement ;
- Transport des conteneurs semés vers l'aire de culture
- Mise en place des conteneurs semés sur les tables de culture.

2.3.1.8 Suivi de la qualité et des rendements

Afin d'assurer une qualité continue de l'opération, il est impératif que des vérifications soient faites en continu tout au long de l'opération. Le suivi de la qualité au moyen des fiches de contrôle doit se faire à toutes les heures au minimum.

La qualité de l'empotage et de l'ensemencement doit être maximale. Les superviseurs ne doivent faire preuve d'aucune tolérance pour le manque de qualité de ces opérations. Il ne faut pas hésiter à transférer certains ouvriers à d'autres postes de travail si les problèmes persistent. Le chef pépiniériste a avantage à spécialiser les ouvriers afin d'optimiser la qualité des opérations. Voir les annexes 2 à 7 sur les suivis d'opération (manuelle et mécanisée).

Le suivi des rendements journaliers permet au chef pépiniériste de bien contrôler les travaux d'ensemencement. Un rendement minimum visé permettra de terminer l'opération en respectant les dates limites physiologiques d'ensemencement pour chaque essence. Il faudra que le chef pépiniériste organise son chantier et ajuste son effectif de travailleurs en fonction de ce rendement visé.

2.3.2 Démariage & repiquage

Lors de l'ensemencement, plusieurs semences sont déposées par cavité afin d'assurer la présence d'au moins un semis viable. Ainsi chaque cavité contient souvent plus qu'un plant germé. Le but de l'opération de démariage et de repiquage est de s'assurer que toutes les cavités ne soient occupées que par un seul plant. Cette opération exige une grande dextérité manuelle, un bon

jugement et une très bonne vision de la part de l'ouvrier. Le chef-pépiniériste a avantage à bien sélectionner les ouvriers ou ouvrières pour cette opération critique.

Le démariage doit commencer lorsque la période de germination est terminée et avant le développement des racines secondaires. Nous avons intérêt à commencer le plus tôt possible parce que la facilité d'extraction du plant favorise une plus grande productivité de l'opération et un minimum de perturbation sur le plant résiduel. En effet, le démariage ne doit pas être retardé car les plants s'ancrent rapidement.

Le repiquage ou regarnis est nécessaire quand aucune semence n'a germé dans une cavité. Le taux de survie du repiquage est plus grand si les racines sont peu développées. L'ouvrier doit utiliser un outil pour repiquer le plant et faire preuve de dextérité.

Donc, cette opération doit être effectuée environ un mois après la germination selon les essences. Les critères de décision pour débiter l'opération sont le suivi de l'évolution de la germination en relation avec le taux de germination annoncé et le développement racinaire. Idéalement, le démariage sera fait avant que le système racinaire se ramifie.

Lors du choix du plant à conserver, le plant le plus au centre de la cavité et le plus grand doit être privilégié. Le plant plus centré aura un développement racinaire périphérique optimum et le plant le plus grand aura plus de chance d'atteindre les standards morphologiques visés.

2.3.3 Techniques culturales

Il s'agit de l'ensemble des régies de culture telles que l'irrigation, l'application d'engrais, l'application de pesticides, le désherbage et l'endurcissement des plants qui sont appliquées au cours de la campagne de production des plants.

Le contrôle et l'optimisation des principales techniques culturales contribuent de façon significative à l'atteinte des objectifs en matière de croissance et des normes de qualité morpho-physiologique des différentes essences forestières.

2.3.3.1 Arrosage

L'eau est une ressource précieuse. C'est pourquoi la gestion de l'eau dans une pépinière doit être bien contrôlée. Le système d'arrosage par asperseur facilite beaucoup le travail du pépiniériste et permet une économie d'eau par rapport au système traditionnel. Toutefois, le jardinier doit bien choisir le moment et la durée de l'arrosage afin de maintenir des conditions d'humidité favorables à la croissance des plants. En général, l'arrosage tôt le matin est préférable parce que la température est plus fraîche donc moins de perte d'eau par évaporation. Un arrosage exécuté l'après-midi d'une journée ensoleillée peut consommer jusqu'à 20% d'eau supplémentaire. Le vent est plus calme le matin et il y a moins de dérive des gouttelettes d'eau. De plus, le feuillage sèche rapidement si on irrigue le matin ce qui diminue les problèmes phytosanitaires.

Le pépiniériste doit tenir un registre de l'irrigation dans lequel la date, le secteur arrosé et la durée sont notés. En plus, le jardinier y ajoute différentes informations sur la température, le vent, la pluie et les problèmes rencontrés. Un exemple de registre est présenté à l'annexe 8. En fin de campagne, le pépiniériste pourra calculer la consommation d'eau totale qui a été nécessaire pour la production.

Au début de chaque campagne, la vérification du bon fonctionnement du système d'arrosage doit être effectuée. Ceci comprend la motopompe, le système de filtration, la pompe doseuse de fertilisation, le réseau de canalisation, les asperseurs, les valves électriques et la pression d'eau. Tout cela afin de maintenir l'uniformité, l'efficacité et l'économie du système d'arrosage. L'utilisation efficace du système d'asperseurs est influencée par plusieurs facteurs : la pression de l'eau, l'espacement des asperseurs, la hauteur des asperseurs, la verticalité des asperseurs, le choix des têtes d'asperseurs (buses), la pente du terrain, la vitesse du vent, la direction du vent, la température et la canopée.

La canopée des plants se définit comme l'architecture des parties aériennes combinée à la surface et à l'angle foliaire. Selon les espèces, la canopée peut causer différentes pertes d'eau à l'arrosage. Afin de rentabiliser au maximum les espaces de culture, les conteneurs ont

avantage à être concentrés le plus possible, c'est-à-dire que les espaces vides pour circuler doivent être minimisés. En plus, cette occupation optimale de la surface permet d'économiser l'eau, les fertilisants, et d'abaisser le coût de production par unité de plant.

Théoriquement, l'efficacité d'un système d'irrigation peut être évaluée en comparant la quantité d'eau stockée dans le substrat des plants après un arrosage avec la quantité totale d'eau appliquée dans les aires de culture. La vitesse à laquelle un substrat peut absorber l'eau est appelée le taux d'infiltration. Dans le cas de la culture en conteneurs, cette vitesse d'infiltration est fonction de la texture du substrat et de la granulométrie de la silice de surface. En général, le compost ne pose pas de problèmes pour le taux d'infiltration.

Si le système d'irrigation a une distribution qui manque d'uniformité, alors la durée d'arrosage doit être augmentée afin d'assurer la survie de tous les plants. En conséquence, plusieurs plants reçoivent trop d'eau et leur croissance sera affectée. Il est donc important de vérifier la bonne distribution de l'eau sur le terrain en effectuant un test d'uniformité du système d'arrosage.

Le pépiniériste doit surveiller de près l'humidité des conteneurs situés en bordure. L'effet de bordure se définit comme un assèchement accéléré du substrat dans les cavités situées en périphérie des cultures. Il faudra tenir compte de ce phénomène dans la stratégie d'irrigation. Afin de corriger partiellement ce problème, différentes actions telles que l'arrosage manuel des bordures, une rotation des conteneurs, l'installation d'un matériau isolant sont conseillés. Les méthodes les plus employées sont l'arrosage manuel des bordures et la rotation des conteneurs de bordure avec ceux situés plus à l'intérieur. Cette rotation permet de corriger partiellement le manque d'uniformité de certains asperseurs.

Le sujet de l'eau est traité plus en détails dans le chapitre 4 sur l'irrigation des plants en pépinière.

2.3.3.2 Fertilisation

Le substrat à base de compost est pauvre en éléments nutritifs. C'est pourquoi la fertilisation est nécessaire afin d'obtenir des plants bien équilibrés qui vont rencontrer les standards de production.

L'utilisation d'engrais solubles permet de fertiliser par le réseau d'arrosage. Cette technique est appelée la fertigation. L'engrais soluble est préparé sous forme concentrée dans un baril d'environ 200 litres. Un injecteur d'engrais soluble permet d'introduire ce fertilisant concentré dans la tuyauterie avec un ratio très précis. La fertilisation est toujours suivie d'un rinçage de 4 à 5 minutes pour éviter les brûlures au niveau du feuillage. La composition d'un mélange contient souvent différents produits et formulations d'engrais.

De plus, la fertilisation fournit un apport d'eau aux plants, donc le pépiniériste doit bien synchroniser la fertilisation avec l'arrosage. Avant de fertiliser, il faut s'assurer que les plants sont bien arrosés et dans un état de non-stress. Suite à une fertilisation, le pépiniériste n'arrosera pas avant un jour ou deux afin d'éviter le lessivage des engrais. La fertilisation est traitée plus en détails dans le chapitre 5.

2.3.3.3 Endurcissement des plants

À l'approche de la période de plantation, il devient nécessaire d'endurcir les plants. Le but de cette action est de préparer les plants à subir des conditions plus difficiles et d'assurer un bon taux de survie en plantation. L'endurcissement permet de stimuler la croissance racinaire et de ralentir la croissance en hauteur. Les moyens employés consistent à enlever les toiles ombrières, à diminuer la fréquence des arrosages et à réajuster la fertilisation.

L'enlèvement des toiles ombrières se fait à des dates différentes selon les espèces, d'où l'importance de regrouper au départ les espèces semblables dans la même section d'ombrière. Il faut irriguer généreusement avant l'enlèvement de l'ombrière. Il est préférable de choisir une journée fraîche ou nuageuse et faire cette opération tôt le matin ou en fin de journée. Quelques conteneurs peuvent être disposer en plein

soleil et observés quelques jours avant la date prévue pour l'enlèvement de la toile. Ce test permet de vérifier si les plants sont prêts à subir un ensoleillement complet. L'enlèvement des toiles ombrières est obligatoire pour obtenir des plants bien préparés aux différents stress environnementaux du site de plantation.

La diminution de la fréquence des arrosages va créer des périodes d'assèchement et stimuler la croissance racinaire. Le plant sera ainsi préparé à croître dans des conditions plus naturelles d'arrosage. En plantation, la disponibilité de l'eau est irrégulière.

L'ajustement de la fertilisation consiste à ralentir l'apport en éléments nutritifs tout en changeant les formulations d'engrais. Les quantités varient selon les essences produites.

2.3.4 Livraison des plants

En zone méditerranéenne, les travaux de plantations forestières ne peuvent commencer que si les sites de reboisement ont reçu environ 350 mm de pluie. La période de plantation débute généralement en novembre ou décembre.

La livraison est planifiée en fonction des besoins des chantiers de reboisement. Les responsables des plantations devraient présenter un calendrier estimatif des besoins hebdomadaires en plants. Le pépiniériste a intérêt à obtenir ce calendrier de livraison des plants afin de prévoir les besoins en main-d'œuvre, en machinerie et en équipements. Les dates de livraison peuvent même influencer les dates d'ensemencement et les traitements culturels pour certains lots de plants.

La culture hors sol en conteneur permet d'obtenir des lots de plants de qualité présentant une grande uniformité et un taux d'occupation élevé. Toutefois, pendant les premières campagnes de production les résultats peuvent ne pas être optimaux. C'est pourquoi le classement des plants peut s'avérer nécessaire afin d'enlever les cavités vides, de regrouper les plants et de retirer les plants de mauvaise qualité. L'inventaire de livraison

sert de guide pour décider si ce travail est nécessaire et en même temps de connaître à l'avance les défauts à corriger. Cet inventaire consiste à évaluer la dimension des plants et la présence de certains défauts. Le classement systématique de certains lots de plants est parfois nécessaire. L'opération est coûteuse mais elle permet d'assurer la meilleure qualité des plants livrés et de minimiser les frais de transport vers les chantiers. De plus, livrer des conteneurs dont toutes les cavités contiennent des plants facilite la tâche des gestionnaires de chantiers.

Le système de transport doit être optimisé en fonction des nouveaux types de conteneurs. Les conteneurs ne doivent pas être empilés directement un sur l'autre pour le transport. Un système d'étagères permet de bien protéger les plants et de minimiser les coûts de transport. Les plants doivent être bien irrigués en pépinière avant leur livraison au site de reboisement. Pendant le transport, ils doivent être protégés du vent et du soleil à l'aide d'une bâche ou de tout autre système.

2.4 Suivi et contrôles

La gestion d'une pépinière forestière ne touche pas seulement les traitements culturaux tels que l'arrosage et la fertilisation mais aussi un ensemble d'activités assurant la saine gestion. Mentionnons par exemple la gestion de la main-d'œuvre, le suivi des opérations, la gestion rationnelle de l'eau, l'évaluation de la qualité des plants, les mesures sanitaires, l'entretien des équipements et infrastructures, la planification, etc.

2.4.1 Suivis des cultures

Dès que l'opération d'ensemencement est complétée, la phase de suivi des cultures débute. Il faut compléter le plus tôt possible le plan détaillé des cultures. Ce plan sera un outil de base durant toute la campagne. Il devra être mis à jour régulièrement. La surface de culture est divisée en sections et sous-sections. L'identification avec de petits panneaux de ces sections sur le site de culture permet de mieux localiser les cultures. L'identification de chacune des essences avec un petit panneau est obligatoire.

Le suivi de croissance des plants débute environ six à huit semaines après l'ensemencement. Les variables morphologiques mesurées sont la hauteur et le diamètre au collet des plants. Le mode et l'intensité de l'échantillonnage doivent permettre d'obtenir des résultats représentatifs pour les populations étudiées. Toutes ces mesures servent à bâtir une courbe standard pour chacune des essences cultivées. La courbe standard représente la progression d'un paramètre dans un intervalle de temps donné. Cette courbe devrait représenter les différentes étapes de croissance de l'espèce, c'est-à-dire la phase post-germination, la croissance exponentielle et l'atteinte d'un plateau avant la fin de saison.

Durant les campagnes suivantes, les mesures seront comparées à ces courbes modèles (courbes standards). S'il existe un écart, le pépiniériste pourra ajuster la croissance en modifiant l'arrosage ou la fertilisation. Le but de ce contrôle est d'atteindre les caractéristiques morphologiques d'un plant idéal ciblé en hauteur, diamètre, rapport hauteur/diamètre, masse racinaire, etc.

Le suivi des fertilisations permet de connaître le bilan nutritionnel durant toute la période de culture. Tous les éléments majeurs et mineurs ajoutés sont notés précisément pour chaque traitement. Les fertilisations sont différentes pour chaque espèce. Les calendriers nutritionnels qui ont donné de bons résultats serviront de calendriers de base pour la prochaine campagne tandis que les autres seront ajustés par le pépiniériste. De plus, le suivi des fertilisations permet de quantifier précisément les engrais utilisés durant la campagne.

Le suivi des applications de pesticides indique les dates, les produits utilisés, les doses appliquées, les secteurs traités, et surtout le motif de l'utilisation. Ce suivi doit indiquer aussi le résultat du traitement, à savoir si c'est un succès ou un échec.

Le suivi de l'arrosage indique les dates, les secteurs, et la durée d'arrosage. Ainsi, la consommation d'eau en mètre cube peut être évaluée précisément pour chaque arrosage. Les bilans mensuels de consommation reliés aux milliers de plants cultivés sont des données précieuses pour la gestion de l'eau.

L'inspection phytosanitaire permet d'identifier les problèmes de maladies, d'insectes, de mauvaises herbes et les problèmes abiotiques. Plus la fréquence des inspections sera élevée, plus il sera possible de traiter les problèmes dès leur apparition. Cette surveillance culturale peut être jumelée avec la vérification des besoins en eau et avec le suivi de croissance. Cette inspection doit se faire au moins à tous les deux jours. Dès que les carottes de substrat peuvent être extraites, l'examen du système racinaire est nécessaire pour analyser la croissance racinaire, l'état de santé et les besoins en eau.

L'enregistrement des problèmes inventoriés devra se faire dans un carnet de note ou un formulaire afin de bien noter la localisation, l'essence touchée, l'ampleur du problème et si possible l'identification du ravageur. Certains outils (loupe 10X, couteau, calepin, crayon, filet à insectes, etc.) sont utiles pour l'inspection. La détection de tous ces problèmes doit faire partie intégrante de la tâche de chaque ouvrier et le pépiniériste doit responsabiliser son personnel à cette fin.

2.4.2 Suivi des opérations

Une fiche de suivi doit être construite pour chacune des opérations durant la campagne. Cette fiche journalière doit inclure la date, le nombre d'ouvriers, le nombre d'heures et les rendements. De plus, des notes doivent être prises sur le temps d'utilisation des équipements (tracteurs, remorque, etc.), la liste des outils nécessaires, le besoin en pièces de rechange et l'organisation du travail. Toutes ces informations permettent d'évaluer les coûts réels de toute la production et ces données permettront d'optimiser la planification de la prochaine campagne.

2.5 Travaux d'entretien des infrastructures

Après la sortie des plants, l'accès sous l'ombrière est facilité. C'est le moment d'en profiter pour effectuer les travaux d'entretien de l'ombrière, du nivellement de l'aire de culture, de l'inspection et du nettoyage complet du système d'arrosage.

2.5.1 Vérification du système d'arrosage

2.5.1.1 Nettoyage du système d'arrosage

Dès qu'une section de culture est vide, c'est-à-dire que tous les plants sont livrés, la vidange de la tuyauterie de cette section doit être faite. Après avoir ouvert les bouchons de fin de ligne d'arrosage, laissez écouler quelques minutes avant de fermer les valves et vidanger par gravité ou avec un compresseur d'air. L'enlèvement de cette eau stagnante diminuera les risques de contamination par les algues ou des pathogènes en plus de l'évacuation des saletés. Ensuite, les bouchons de fin de ligne seront remis.

Lorsque la campagne débute, un autre nettoyage de la tuyauterie doit se faire. Il s'agira de faire fonctionner l'eau d'une section quelques minutes en laissant ouverts les bouchons de fin de ligne.

2.5.1.2 Vérification des pressions et des débits d'arrosage

La vérification de la pression à la pompe et à la sortie des asperseurs est très importante pour s'assurer de la qualité de l'arrosage. La vérification du débit à la sortie des asperseurs est nécessaire aussi. Ces deux paramètres influencent grandement l'uniformité de l'arrosage.

2.5.1.3 Test d'uniformité du système d'arrosage

Si le système d'irrigation a une distribution qui manque d'uniformité, alors la durée d'arrosage doit augmenter afin d'assurer la survie de tous les plants. En conséquence, plusieurs plants reçoivent trop d'eau et leur croissance est affectée. En plus de causer un gaspillage d'eau, des fertilisants sont lessivés dans l'environnement. C'est pourquoi il est important de vérifier la bonne distribution de l'eau sur le terrain en effectuant un test d'uniformité.

Cette vérification doit être faite annuellement et de préférence lorsque l'aire de culture est vide. L'utilisation de contenants de même diamètre que les cavités et répartis selon un patron bien défini va permettre d'évaluer la qualité de l'uniformité de l'arrosage.

Selon le type d'asperseur et leur espacement, en général de 60 à 100 contenants peuvent être nécessaires pour obtenir une bonne précision. Le test doit se faire en absence de vent ou en présence d'un vent très faible. La pression doit être vérifiée à la sortie de chacun des asperseurs en cause. Pour le test, il faut faire fonctionner le système d'arrosage un temps précis et ensuite mesurer le contenu de chacun des contenants. Plusieurs répétitions sont nécessaires pour assurer la précision du test.

La formule pour quantifier l'uniformité de la distribution de l'eau (UDE) est :

$$\text{UDE} = \frac{\text{moyenne des volumes les plus bas (quartile)}}{\text{Moyenne des volumes}} \times 100$$

où la moyenne des volumes les plus bas (quartile) est la moyenne des 25% des contenants qui contiennent les plus bas volumes mesurés.

| UDE | TAUX D'UNIFORMITÉ |
|----------|-------------------|
| < 73% | très pauvre |
| 73 à 78% | pauvre |
| 79 à 85% | acceptable |
| > 85% | excellent |

Les résultats du test peuvent être interprétés ainsi :

$$\text{TP} = \frac{(\text{moyenne des volumes d'eau des contenants en ml}) \times (60 \text{ min/ heure}) \times 10 \text{ mm/cm}}{(\text{surface du haut du contenant en cm}^2) \times (\text{durée du test en minutes})}$$

En plus, ce test peut servir à calculer le taux de précipitation (TP) en millimètre par heure.

2.5.1.4 Nettoyage des buses d'asperseurs

Le nettoyage des buses d'asperseurs doit se faire au moins une fois par année ou plus selon les besoins. Dans le moindre doute, la buse doit être démontée et nettoyée. En général, les eaux d'arrosage en Tunisie sont très chargées en minéraux qui se déposent facilement dans la tuyauterie. Les buses peuvent être nettoyées dans une solution concentrée de vinaigre (50 % ou plus).

Un examen visuel des buses pendant leur fonctionnement doit être effectué à chaque arrosage, ce qui permet de corriger très rapidement le colmatage des buses défectueuses.

2.5.1.5 Réparation du système

Une inspection régulière de la tuyauterie doit être effectuée afin de réparer rapidement les fuites. Les fuites même mineures ne doivent pas être tolérées car elles causent une baisse de pression et un gaspillage d'eau.

En plus, le pépiniériste doit s'assurer du bon alignement des asperseurs, de la bonne hauteur des buses et de la verticalité des asperseurs.

2.5.2 Mesures sanitaires

2.5.2.1 Contrôle des mauvaises herbes

Le problème de mauvaises herbes devrait être très faible si le pépiniériste respecte certains principes de base comme l'application de silice en surface du substrat, l'assèchement de la surface du substrat entre les arrosages (sauf en période de germination) et l'entretien régulier des filtres du système d'irrigation.

Les mauvaises herbes ne doivent pas être tolérées dans les conteneurs, sur l'aire de culture et aussi à proximité de l'aire (quelques dizaines de mètres). Dans les conteneurs, les mauvaises herbes infligent une concurrence avec le plant pour la lumière et les éléments nutritifs. Il faut donc effectuer un désherbage manuel le plus vite possible. Le premier désherbage a lieu en même temps que le démariage, ce qui rend l'opération moins coûteuse. Plus la mauvaise herbe croît et se développe, plus les dégâts et la compétition seront importants.

La présence de mauvaises herbes sur l'aire de culture ou en périphérie est une source potentielle de contamination (mauvaises herbes, insectes ou maladies). L'élimination peut se faire par un désherbage manuel (extraction complète du plant) ou par l'utilisation d'un herbicide. Après la livraison des plants, le nettoyage du terrain manuellement ou avec un herbicide est souvent nécessaire.

Parmi les principaux types d'herbicides employés mentionnons les herbicides de contact et systémiques. Les herbicides de contact sont efficaces pour

les mauvaises herbes annuelles au stade semis. Ces herbicides agissent très rapidement mais détruisent seulement les parties de la plante avec lesquelles ils sont en contact. Ainsi, le système racinaire n'est pas détruit par l'herbicide et la plante peut souvent redémarrer sa croissance. Les herbicides systémiques sont transportés par la sève dans la plante entière, incluant les racines. Ils agissent plus lentement, mais ils sont très efficaces pour le contrôle des mauvaises herbes annuelles et vivaces.

2.5.2.2 Contrôle des insectes et des maladies

Le pépiniériste doit faire preuve de vigilance face aux problèmes d'insectes ou de maladies. En plus de l'identification des symptômes et des dommages, les connaissances des cycles biologiques et du comportement des ravageurs facilitent davantage leur contrôle. De plus, les inspections phytosanitaires fréquentes vont permettre de corriger les dégâts dès leur émergence. Ce diagnostic est très important et il peut être jumelé avec le suivi de croissance et les traitements culturaux (fertilisation, arrosage).

Après la détection d'insectes ou de maladies, le pépiniériste doit éviter une lutte chimique non-raisonnée. L'utilisation des pesticides se doit d'être rationnelle. L'emploi d'un insecticide ou d'un autre pesticide doit se faire en dernier recours. L'arrosage en fin de journée ou durant la nuit doit être évité parce qu'un feuillage qui reste humide durant plusieurs heures consécutives devient plus vulnérable aux attaques des pathogènes (maladies fongiques).

2.5.2.3 Principes d'une lutte efficace contre les ravageurs

Voici huit éléments permettant une lutte intégrée efficace :

- Gérer des techniques culturales dans le but de prévenir les problèmes d'insectes, de maladies et de mauvaises herbes ;
- Savoir identifier correctement les ravageurs potentiels ;
- Bien connaître les différents moyens de luttés possibles ;
- Inspecter de façon régulière (dépistage) ;
- Identifier un seuil d'intervention (économique) ;
- Choisir le moyen de lutte approprié ;
- Identifier le bon moment d'intervention ;
- Intervenir et évaluer les résultats.

2.5.3 Utilisation sécuritaire des pesticides

2.5.3.1 Toxicité des pesticides

La toxicité d'un produit est déterminée par la dose létale (DL 50) qui se définit comme étant la quantité de produit actif par kilogramme de poids vif qui cause un taux de mortalité de 50 % dans la population testée (rats, lapins). En général, on identifie trois degrés de toxicité : très toxique, toxique et modérément toxique.

2.5.3.2 Manipulation des pesticides

Les ouvriers doivent prendre certaines précautions lors de la manipulation des pesticides. L'ouvrier doit être protégé lors de la préparation du mélange et de l'application du traitement. Les pesticides peuvent pénétrer non seulement par ingestion et par voie respiratoire, mais aussi par voie cutanée. Les produits ont différentes vitesses d'absorption dans le corps.

Le port de vêtements protecteurs est fortement suggéré. Il s'agit principalement du port de gants de caoutchouc, de combinaison, d'un chapeau, de lunettes protectrices, de bottes de caoutchouc, d'un respirateur à cartouches, etc.

Après l'application de pesticides, il est conseillé de réduire l'accès dans les secteurs traités. Une affiche identifiant les secteurs traités est suggérée. Selon le type de produit, le délai peut varier de 12 à 72 heures.

2.5.3.3 Entreposage des pesticides

L'entreposage des pesticides doit assurer la bonne conservation des produits et la sécurité des ouvriers. Il faut donc choisir un endroit bien aéré, frais, sec, fermé à clef et bien identifié (danger poison, pesticides entreposés, défense de fumer).

2.5.3.4 Élimination des contenants vides

Les contenants de pesticides doivent être vidés au maximum de leur contenu. On doit effectuer un triple rinçage des contenants tout en récupérant ce rinçage pour un traitement. Les contenants et les emballages vides doivent être découpés ou cassés afin de s'assurer qu'ils ne seront pas utilisés à d'autres fins.

2.5.4 Nettoyage des conteneurs

Même si aucun insecte ou pathogène n'a été décelé dans la pépinière, il est préférable de laver les conteneurs avant de les réutiliser pour la prochaine campagne. Le lavage est nécessaire s'il y a présence de maladies ou d'insectes, ou s'ils proviennent d'une autre pépinière. Dans l'éventualité où des résidus de compost ou de plants morts sont présents dans les cavités, il est recommandé de les détruire pour des raisons sanitaires.

Une solution d'eau de javel à 2 % (hypochlorite de sodium) est suggérée pour le lavage des conteneurs. La méthode consiste à utiliser trois petits bassins : tout d'abord s'assurer que les cavités des conteneurs ne contiennent pas de substrat, ensuite faire tremper dans le premier bassin et brosser les cavités contenant des dépôts ; ensuite tremper pendant au moins 30 secondes dans le bassin contenant la solution d'eau de javel et enfin rincer dans le dernier bassin.

2.6 Rapport annuel d'activités

Le gestionnaire de la pépinière doit produire un rapport annuel dont le contenu mettra l'accent sur les différentes activités de la pépinière. Ce rapport sera un outil de planification précieux pour la prochaine campagne. En plus, il servira de manuel de références pour comparer les campagnes de production. Ce rapport assurera la répétition du succès des campagnes.

Voici le contenu suggéré d'un rapport annuel d'activités :

- Profil de la pépinière :

Décrire l'organisation du personnel et les principales infrastructures. Présenter un plan de la pépinière en décrivant les équipements (motopompe, boîte de contrôle, dosatron, asperseurs, etc.). Discuter des volumes historiques de production .

- Résumé des opérations :

Présenter pour chaque opération une brève description de l'opération, les dates de début et de fin, le volume de travail effectué, le nombre de jours-personnes ainsi que les rendements moyens obtenus. Un graphique peut être présenté pour chacune des opérations. Un calendrier réel des opérations de l'année devrait être élaboré.

- Plan des cultures :

Présenter un plan des cultures avec le nombre de cavités occupées pour chaque essence.

-Résumé des applications de fertilisants et de pesticides :

Élaborer pour chaque essence et provenance un tableau

présentant les différents traitements. Présenter un tableau synthèse montrant les quantités totales d'engrais et de pesticides utilisés dans toute la campagne.

- Entretien des cultures :

Discuter des différents travaux d'entretien des cultures tels que le désherbage, arrosage des bordures, roulement des filets de l'ombrière, etc.

- Présentation des paramètres de croissance :

Présenter les résultats du dernier suivi de croissance pour chaque essence et la courbe de croissance de toute l'année pour chaque essence (hauteur, diamètre, H/D, masses sèches, etc.)

- Eau d'arrosage :

Présenter les analyses d'eau avec quelques commentaires. Évaluer la quantité d'eau utilisée pour toute la campagne. Élaborer un graphique montrant la consommation par semaine (histogramme). Ne pas oublier d'inclure l'eau perdue après chaque arrosage.

- Climatologie :

Présenter les données concernant la pluie et la température. Être concis et mettre en annexes les tableaux détaillés. De brefs commentaires sur chaque tableau seraient souhaitables.

- Discussion et recommandations :

Résumer les bons points et les problèmes rencontrés durant la campagne. Présenter des recommandations pour mieux réussir la prochaine campagne (exemple : formation des pépiniéristes, nommer un responsable pour la pépinière, installation du téléphone, problème d'approvisionnement en silice, etc.).

Conclusion

Une bonne planification et un suivi adéquat des différentes activités sont les gages de succès d'une campagne qui vise à obtenir une production optimale. En effet, la planification des besoins en personnel, en matériel et en équipement permet d'établir un calendrier des diverses opérations de la pépinière en tenant compte des spécificités des différentes espèces à cultiver. De bons outils de gestion et de contrôle permettent d'assurer le maintien des infrastructures et des équipements et d'établir des comparaisons des résultats obtenus avec les objectifs planifiés et avec les résultats des campagnes précédentes, contribuant ainsi à améliorer les techniques culturales.

Chapitre 3

Compostage et substrat de croissance

Introduction

Le substrat de croissance utilisé généralement dans les pépinières traditionnelles est constitué à partir de sol agricole seul ou mélangé avec du sable, du fumier ou du terreau forestier. Il existe plusieurs variantes pour la constitution des substrats selon la disponibilité des matériaux et la localisation de la pépinière. Dans certaines régions où l'approvisionnement en substrat est un problème majeur, les substrats contenus dans les sachets de croissance de l'année antérieure dans lesquels il n'y a pas eu de plants seront recyclés pour la production de plants forestiers de l'année. Parfois, les sachets sont vidés de leur substrat, qui sera réutilisé directement ou mélangé avec d'autres constituants. Toutes ces pratiques sont sources d'introduction de microorganismes (champignons pathogènes, virus, nématodes, etc.) et de mauvaises herbes qui peuvent affecter la germination et la croissance des plants aussi bien en pépinière qu'en site de reboisement. De plus, l'utilisation de terreau forestier comme substrat de culture contribue de façon significative à la baisse de la productivité forestière et à l'épuisement de la couche de matière organique qui prend de nombreuses années à se reconstituer.

La nouvelle approche a pour but d'utiliser un substrat standard à base de compost en valorisant différents constituants de la biomasse forestière. La biomasse utilisée pour ce compost en Tunisie est constituée de feuilles et de branches d'arbres ou d'arbustes feuillus dont le diamètre est inférieur à sept centimètres. Les écorces des différentes espèces peuvent être utilisées. Cette biomasse doit être broyée avec une machine judicieusement sélectionnée afin de produire des particules relativement petites et uniformes pour favoriser la décomposition.

Si les caractéristiques physiques et chimiques sont adéquates et correspondent aux exigences des essences à cultiver, le compost pourra constituer 100 % du substrat de croissance. Sinon, il est recommandé d'ajouter au compost certains matériaux, comme les écorces, afin d'obtenir un substrat de croissance optimal pour les plants forestiers.

La production du compost requiert un suivi quotidien de la température pour optimiser la durée relative à

l'atteinte de la maturité du compost en pépinière forestière. L'utilisation du compost comme constituant principal du substrat de croissance pour la production de plants forestiers a plusieurs avantages, notamment :

- la porosité et la texture fibreuse du compost permettent aux racines d'avoir accès à l'air et aux espaces contenus dans le substrat tout en favorisant un bon développement du système racinaire ;
- la capacité élevée de retenir l'eau et de la rendre disponible pour le plant ;
- la capacité d'échange cationique qui permet de retenir et de rendre disponibles les éléments nutritifs nécessaires à la croissance ; et
- l'absence d'agents pathogènes, de spores et de semences de mauvaises herbes suite à une pasteurisation partielle due aux températures élevées atteintes lors du processus de compostage.

De plus, le compost peut être utilisé comme moyen de lutte biologique permettant de diminuer l'utilisation des pesticides en pépinière. En effet, le contrôle des maladies suite à l'utilisation du compost est souvent attribué à quatre mécanismes :

- la compétition entre les agents pathogènes et les microorganismes bénéfiques aussi bien au niveau des racines qu'au niveau du feuillage;
- la production de substances antibiotiques par les microorganismes dans le compost;
- la prédation et le parasitisme (un organisme consomme un autre);
- et la résistance systémique induite au niveau des plantes en réponse à l'utilisation du compost.

Le présent chapitre a pour objectifs de i) décrire les principaux fondements théoriques et pratiques de compostage, et ii) de mettre à la disposition des pépiniéristes des outils pratiques de suivi et de gestion de l'opération de compostage en vue de produire un substrat standard à base de compost.

1. Fondements théoriques

Cette partie sera axée principalement sur les principes et les principaux paramètres de compostage à considérer lors des opérations de compostage et l'optimisation des différents processus biologiques de dégradation de la biomasse.

1.1 Définition du compostage

Le compostage est la décomposition biologique des constituants organiques sous des conditions contrôlées aboutissant à la biosynthèse d'un compost mûr et riche en matières humiques. La décomposition de la matière organique par le compostage est réalisée grâce aux processus de minéralisation et d'humification.

1.2 Paramètres du compostage

La fabrication d'un bon compost nécessite le contrôle de nombreux facteurs et de paramètres qui influencent le processus biologique du compostage. Pour assurer l'uniformité et la maturité du produit final, le pépiniériste devra effectuer un suivi quotidien lors de la préparation de la biomasse et tout au long du processus de maturation.

Les principaux paramètres du compostage sont ceux qui influencent la qualité et la nature du compost, ainsi que l'activité des microorganismes (principalement bactéries & champignons). Parmi les principaux paramètres affectant la durée de décomposition et la qualité finale du compost, mentionnons :

- la nature et la dimension des particules de la biomasse à composter,
- la température du matériel en décomposition,
- l'oxygénation,
- le taux d'humidité, et
- le pH.

Ces paramètres influencent la qualité finale du compost et leur contrôle s'avère nécessaire tout au long des différentes phases de compostage. Nous allons passer en revue ces paramètres séparément, mais les interactions entre ces paramètres ont un rôle déterminant sur la durée du compostage et la qualité du produit final.

1.2.1 Dimension des particules, composition et nature de la biomasse

La durée du compostage, la qualité du compost, la cinétique des facteurs physico-chimiques au niveau des andains sont intimement liées à la composition et à la dimension des particules à composter. L'activité des microorganismes responsables de la dégradation est dépendante principalement de l'équilibre entre le carbone et l'azote. Le carbone disponible est l'élément majeur qui détermine l'efficacité de dégradation de la matière organique par les microorganismes. La demande en carbone est plus élevée que la demande en azote. Près de 50 % de la masse cellulaire des microorganismes est constituée de carbone tandis que l'azote ne représente que 2 à 8 %.

Les biomasses utilisées devraient être relativement riches en azote (biomasse foliaire et autres résidus verts), élément indispensable à la croissance des microorganismes de dégradation des composés celluloseux. La cinétique de décomposition de ces matériaux sylvicoles est fortement influencée par le rapport carbone-azote (C/N). Ce rapport devrait être compris entre 25/1 et 35/1. En pratique, la matière verte devrait constituer 25 à 50 % du mélange et la matière ligneuse 50 à 75 %. Dans le cas où le matériel aurait un rapport C/N élevé (peu de feuillage ou feuillage âgé), un enrichissement en azote est nécessaire au moment de la mise en andain. La multiplication et la croissance des microorganismes sont proportionnelles à la quantité d'azote disponible dans le mélange. Tout au long du processus de compostage, le rapport C/N diminuera pour atteindre une valeur comprise entre 8 et 15 à maturité.

La dimension des particules a un rôle déterminant sur la cinétique de leur dégradation. Les microorganismes sont plus efficaces lorsque les particules sont de petite taille. La surface attaquée par les microorganismes est alors beaucoup plus grande. Les particules trop fines devront être évitées pour ne pas affecter l'aération en réduisant l'espace lacunaire. Le broyage des matériaux sylvicoles en particules trop fines engendre une décomposition lente (putréfaction) de la matière organique et le dégagement d'odeurs nauséabondes. L'utilisation de particules grossières diminue la surface attaquée par les microorganismes et restreint

considérablement la dégradation des matériaux sylvicoles. En plus d'augmenter le temps nécessaire au compostage, les particules grossières diminuent la qualité physique du compost. Elles créent de grands espaces lacunaires et résultent en un substrat trop poreux.

Un mélange de particules de dimensions de 1 à 3 cm est souhaitable. La sélection d'un broyeur adapté permet le broyage des branches de façon adéquate. Le broyeur devrait être muni de couteaux et de marteaux qui permettent d'obtenir des particules de dimensions convenables. Souvent un grillage installé à la sortie permet le calibrage des particules.

La dimension finale des particules du compost mûr a des effets directs sur :

- la porosité du compost et les propriétés (plus particulièrement l'aération et la capacité de rétention en eau) du substrat;
- la nécessité de mélanger le compost avec d'autres matériaux pour obtenir un substrat approprié;
- la croissance des racines en affectant le contact substrat-racine ;
- la gestion de l'irrigation et de la fertilisation.

1.2.2 Température

Après l'édification des andains, l'activité des microorganismes aérobiques est à l'origine de l'augmentation de la température (figure 3.1a). Ces microorganismes produisent de la chaleur en oxydant la biomasse. Chaque classe de microorganismes (psychrophiles, mésophiles et thermophiles) se multiplie dans un intervalle de température bien déterminé. Selon la composition de la biomasse, la température à l'intérieur des andains devra atteindre une valeur ou un intervalle de température optimal pour favoriser les processus de décomposition.

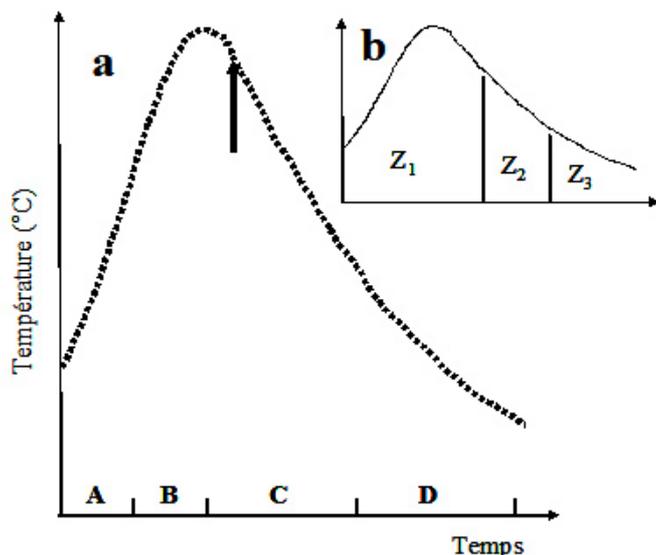
Lorsque les conditions de dégradation sont optimales, la température au niveau des andains suit une évolution typique caractérisant chaque stade de dégradation de la biomasse (figure 3.1a). Elle montre que l'andain passe par un stade d'échauffement (mésophile & thermophile), de refroidissement et de maturation. Au départ, l'andain est à la température ambiante, puis il

s'échauffe à cause de la décomposition des éléments solubles, c'est la phase mésophile. À la phase thermophile, la température de l'andain est maximale (température de pointe ou point de stabilité : 60 à 75°C), selon la nature de la matière organique, une bonne partie des champignons responsables de la dégradation des composés solubles (sucres, amidon et lipides) sont détruits. Cette phase de pasteurisation (55 à 65°C), maintenue au moins pendant trois jours, affecte la viabilité et le pouvoir de germination de la majorité des semences des mauvaises herbes et des spores d'agents pathogènes.

Durant la phase de refroidissement, les actinomycètes s'installent et favorisent la dégradation des polymères (cellulose et hémicellulose). Une fois que la température se stabilise en se rapprochant de celle de l'atmosphère ambiante, c'est la phase de maturation caractérisée par la formation d'humus.

Les retournements des andains devraient être effectués selon l'évolution de la température en favorisant la phase de dégradation dominante (mésophile et thermophile, figure 3.1a).

Figure 3.1. Exemples d'évolution théorique (a) de la température et (b) des besoins en oxygène dans un andain de compost. La flèche indique le moment de faire les retournements des andains à l'échelle opérationnelle.



Température (a)

A : phase mésophile caractérisée par une augmentation rapide de la température due à la décomposition des éléments solubles;

B : phase thermophile caractérisée par la destruction des champignons et l'obtention de point de stabilité c'est à dire que la température de pointe ou de pasteurisation est atteinte dans l'andain;

C : phase de refroidissement caractérisée par la réinstallation des champignons, la diminution de la température et la décomposition des polymères;

D : phase de maturation caractérisée par la formation d'humus et que la température au niveau de l'andain est presque égale à celle de l'environnement extérieur.

Besoins en oxygène (b)

Zone 1 : caractérisée par une activité maximale de dégradation aérobie. Les besoins en oxygène sont très élevés.

Zone 2 : caractérisée par une activité moyenne de dégradation aérobie. Les besoins en oxygène sont moyens.

Zone 3 : caractérisée par une activité faible de dégradation aérobie. Les besoins en oxygène sont faibles.

La dégradation peut être accélérée par l'addition de compost mûr à la biomasse fraîche dans un rapport de 3% en volume ou en pratiquant une inoculation par des microorganismes spécifiques à la dégradation de la cellulose comme *Coprinus ephemerus*.

Différents travaux sur le compostage ont démontré une destruction totale de plusieurs agents pathogènes (*Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Botrytis* et *Erwinia*), de nématodes (*Meloidogyne* sp.) et une réduction de l'activité des virus durant la phase thermophile. Cette destruction est due à l'augmentation de la température, à la formation de substances anti-fongiques et à la toxicité de certains composés formés lors de la décomposition.

La dimension de l'andain a un effet important sur l'évolution de la température et sur l'oxygénation. Afin de minimiser les pertes de chaleur de l'andain et de maximiser l'oxygénation, on recommande d'édifier des andains de 1,5 m de largeur par 1,5 m de hauteur. La longueur est déterminée en fonction de la dimension de la dalle en béton de compostage.

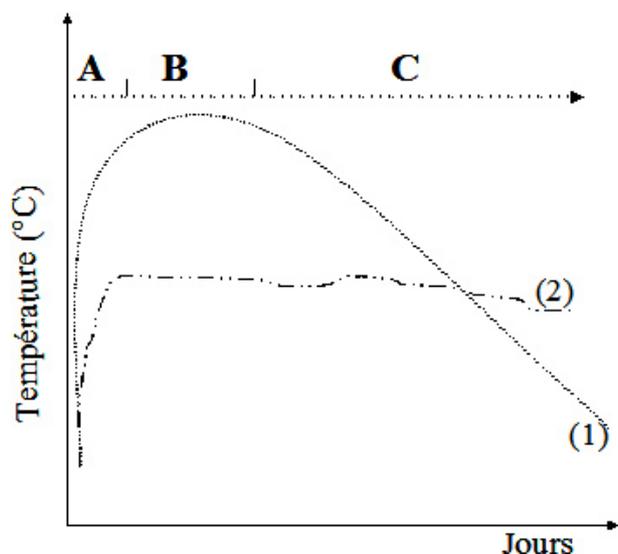
Pour les écorces, la durée des processus de dégradation thermophilique est dictée par le contenu en cellulose. Elle varie en fonction de l'âge de l'arbre et de l'espèce. Les écorces des pins contiennent moins de 5% de carbone facilement décomposable alors que les écorces des feuillus contiennent plus de 40% de carbone. Celles-ci contiennent des copeaux enlevés lors de l'écorçage, ce qui augmente la durée de compostage. Pour faciliter le compostage des écorces et éliminer les substances phénoliques avant l'opération de broyage et de mise en andain, les écorces devraient être stockées en tas sans apport en azote et laisser pendant au moins une année. Ce sont les eaux de pluie qui permettront de lessiver ces substances. Ce lessivage n'est efficace que sur la couche superficielle, d'où l'importance des retournements périodiques lors du stockage.

D'une façon générale, l'augmentation de la température est fonction du degré de fermentescibilité (aptitude à fermenter) de la matière à composter (figure 3.2). Elle détermine la cinétique de décomposition des matériaux sylvicoles et donc le flux calorifique émis par unité de temps et unité de masse. L'évolution de la température varie en fonction de la composition des matériaux à composter et de la nature des échanges thermiques (figure 3.2).

Figure 3.2. Exemple d'évolution de la température dans des andains de différents constituants organiques lors du compostage (adaptée de Mustin 1987).

Constituants très fermentescibles (courbe 1: exemple du broyat des Acacias, des Eucalyptus, etc.).

Constituants peu fermentescibles (courbe 2: exemple des écorces, des marcs de raisin, des grignons des olives, etc.).



- La zone A est caractérisée par une production de chaleur qui dépasse celle des pertes.
- La zone B est caractérisée par un équilibre entre les pertes et la production de chaleur (plateau thermique).
- La zone C est caractérisée par l'importance des déperditions de chaleur et une diminution progressive de la température.

1.2.3 Oxygène

Les microorganismes responsables de la dégradation de la matière organique sont aérobiques. Ils nécessitent un approvisionnement continu et suffisant en oxygène durant la décomposition des matériaux sylvicoles broyés (figure 3.1b). L'apport en oxygène est assuré lors des retournements des andains. Une faible aération favorise le développement des microorganismes anaérobiques et des conditions acides. C'est pourquoi au moment de la sélection des matériaux et le broyage de ceux-ci, le pépiniériste doit porter une attention particulière afin d'avoir des particules de dimensions adéquates. Ceci contribue à maintenir une bonne aération à l'intérieur des andains de compost. Pour faciliter l'aération naturelle, les andains ne doivent pas

dépasser 1.5 m de largeur et 1.5 m de hauteur, tel que mentionné précédemment. La longueur n'a pas de limite sinon d'être relative à la dimension de la dalle de compostage.

La bonne oxygénation du compost peut aussi être affectée par un arrosage excessif des andains. Si le matériel est très humide, c'est-à-dire saturé en eau, les espaces lacunaires seront occupés par l'eau et non par l'air.

1.2.4 Humidité

L'eau est indispensable à l'accélération de la décomposition de la matière organique par les microorganismes et à la multiplication de ces microorganismes. L'humidité ou la teneur en eau excessive dans le compost rend l'espace lacunaire très réduit et empêche les échanges gazeux. L'humidité optimale au niveau des andains devrait être maintenue entre 50 et 70 % en fonction des débris à composter.

La libération de gouttelettes d'eau à partir d'un échantillon de compost pressé légèrement dans la main nous donne une idée sur l'humidité du compost. Si le compost est trop humide, l'espace lacunaire devient faible créant ainsi un milieu anaérobique. Ceci favorisera le dégagement d'odeurs nauséabondes. Pour remédier à cette situation d'excès d'eau, il suffit d'ajouter une quantité de compost capable d'absorber cette eau. L'humidité devra être ajustée lors des retournements des andains.

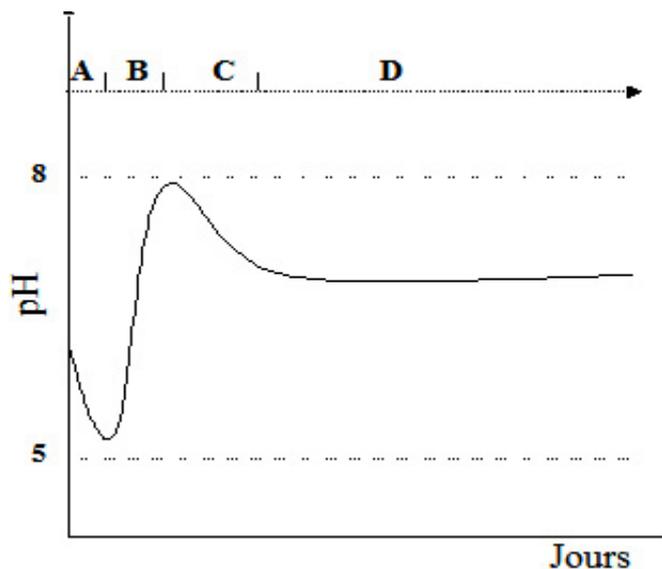
1.2.5 pH

Le pH a une grande influence sur la multiplication et la vie des microorganismes. Le suivi du pH durant l'opération de compostage (figure 3.3) a révélé que:

- au début de la phase thermophile, le pH subit une diminution en raison de la production de gaz carbonique et d'acides organiques générés par les microorganismes (A);
- Ensuite, le pH augmente et devient alcalin à cause de la production d'ammoniac (B);
- le pH se stabilise et est accompagné d'une diminution du rapport C/N et des réactions plus lentes (C);
- lors de la phase de maturation, le pH devient plus stable et se rapproche de la neutralité (entre 6 et 8) (D).

Le producteur n'a que peu de contrôle sur la valeur finale du pH. Cependant, un suivi permet de mieux cerner l'évolution du processus de compostage et de caractériser le produit final.

Figure 3.3. Variation théorique du pH dans les andains au cours du compostage (adaptée de Mustin 1987 et de Dalzell et al. 1988).



2 Fondement pratique du compostage

2.1 Approvisionnement en biomasse

La sélection de la matière sylvicole à composter doit tenir compte de plusieurs critères, notamment :

- de la disponibilité de façon continue de la ressource en quantité et en qualité,
- du coût d'acquisition et du coût de transport jusqu'à la pépinière,
- de sa fermentescibilité,
- de la facilité à la broyer en particules uniformes,
- et de la compatibilité du compost avec le substrat de croissance recherché.

En Tunisie, l'approvisionnement en branches d'*Acacia cyanophylla* ne pose pas de problème majeur pour la majorité des régions. Lors de l'exploitation des plantations, les branches de faibles diamètres peuvent être récupérées pour le compostage. D'autres espèces d'arbustes peuvent être utilisées comme source végétale pour le compostage. En Tunisie, des expériences réalisées lors de la première phase de modernisation des pépinières forestières ont été concluantes en utilisant

des branches de maquis pour la production du compost. Le maquis est constitué par diverses espèces variées, plus particulièrement *Arbutus unedo*, *Erica arborea*, *Erica multiflora*, *Cistus salvifolius*, *Cistus monspeliensis*, *Calycotome villosa*, *Genista tricuspidata*, *Genista ulicina*, *Pistacia lentiscus*, *Phyllyrea latifolia*, *Daphne gnidium*, *Myrtus communis* & *Rhamnus alaternus*. Cependant, cette matière contient plus de lignine et moins de feuillage vert. La présence de branches très lignifiées dans la biomasse du maquis diminue la productivité de l'opération de broyage.

Les branches servant de matière de base sont prélevées sur un peuplement jeune ayant une biomasse foliaire abondante. Le feuillage doit avoir une couleur vert foncé. L'utilisation des branches ayant un feuillage âgé, coriace et légèrement chlorosé défavorise partiellement le processus de dégradation à cause de sa faible teneur en azote. Les branches doivent avoir un diamètre variant de deux à sept cm. Si l'approvisionnement en branches d'Acacia est abondant, le pépiniériste pourra privilégier l'utilisation de branches ayant un diamètre de deux à trois cm afin d'augmenter la durée de vie des couteaux et des marteaux en plus de diminuer le taux de carbone dans le broyat initial (photo 3.1 a-c). Afin de respecter un rapport C/N entre 25 et 35, la biomasse ou le volume du feuillage devrait constituer 25 à 50 % du mélange et la matière ligneuse devrait varier entre 50 et 75 %. Mais cette proportion doit toujours être adaptée en fonction des matériaux utilisés (succulence) ainsi que des résultats de compostage et de porosité des substrats des productions antérieures.

Certains constituants peuvent être utilisés dans la fabrication du substrat final en pépinière. La généralisation de ces produits ne peut se faire qu'après avoir déterminé l'effet des différentes proportions du mélange sur les propriétés physico-chimiques et la croissance des plants durant la saison de croissance. Les quantités à utiliser dans le substrat final doivent être évaluées en fonction des caractéristiques de porosité et d'acidité du compost mature afin de produire un substrat de croissance optimal. Ces produits tels les écorces, les marcs de raisins et les grignons, peuvent être stockés à l'avance à l'air libre; ainsi les tannins et les produits phénoliques seront lessivés par la pluie. Il est préférable que ces résidus subissent des retournements durant la période de stockage afin que les pertes par lessivage soient homogènes.

Il est conseillé que chaque pépinière arrive à produire un compost homogène et régulier à chaque année. Ce compost standard régularise et facilite la culture des plants année après année.

2.2. Préparation pour le Compostage

2.2.1 Quantité de compost à produire

Il est important pour la réussite de la production de compost, que le pépiniériste estime la quantité de substrat final nécessaire à la production de plants forestiers prévu pour la saison. La quantité de matériel vert pour la production du compost doit être évaluée en fonction de la quantité du substrat nécessaire à la production de plants. De façon générale, le pépiniériste doit considérer que le compostage engendre une réduction de 50% du volume initial du matériel frais à composter.

2.2.2 Dalle de compostage

Cette dalle de compostage est conçue pour faciliter la manipulation du compost et éliminer les possibilités de contamination par le sol et tous autres organismes indésirables comme les nématodes et les champignons. Elle est dimensionnée de façon à faciliter la mise en andain du compost, ainsi que la réalisation des opérations de retournement (photo 3.1d).

La dalle doit être située près de la pépinière afin de réduire le transport. Elle doit avoir une pente de 1% pour permettre un bon drainage des lixiviats issus des différents types de composts. En vue d'éviter toute percolation des produits phénoliques vers la nappe phréatique, toutes les aires de compostage sont dotées d'un puit en béton spécifique à la récupération complète des lixiviats. Un approvisionnement en eau doit être disponible en tout temps.

Dans certaines régions où les précipitations sont abondantes et où l'ensoleillement est fort en période de production du compost, il peut être intéressant d'avoir un toit au-dessus de la dalle de compostage. Ce toit permettra d'éviter les apports excessifs d'eau sous forme de précipitations, la dessiccation des couches superficielles et le recours aux arrosages fréquents des andains de compost.

La grandeur de la dalle de compostage doit être établie selon la quantité de compost initial nécessaire. Il est estimé qu'une surface de 600 m² est suffisante pour l'installation d'andains ayant un volume total de 400 m³



Photo 3.1 : Principales étapes de l’opération de compostage, notamment a) le choix et la qualité des branches d’*Acacia cyanopylla*; b) un exemple de broyeur à couteaux; c) des branches broyées avec broyeur muni d’un système de couteaux et de marteaux; d) une vue générale d’une aire de compostage en béton et des andains de compost des branches d’*Acacia cyanopylla*; e) suivi quotidien de la température à l’aide d’un thermomètre à sonde d’une longueur de 90 cm et qui peut atteindre 70°C; f) opération de tamisage du compost à l’aide d’un tamis muni d’un convoyeur (Clichés : Lamhamedi).

3. Broyage du Matériel

Le matériel initial pour le compostage doit être broyé par un broyeur équipé de couteaux et de marteaux pour obtenir les dimensions optimales de particules. Une fois les branches coupées, elles doivent être broyées rapidement pour éviter la perte d'humidité au niveau du feuillage (photo 3.1 a-c).

En fonction de l'éloignement du site, du type de broyeur utilisé (avec prise de force ou électrique) et des dépenses engendrées par le transport des branches, le broyage peut se faire sur le site d'exploitation ou à la pépinière. Le broyage en site d'exploitation permet d'économiser sur les frais de transport de la biomasse en diminuant le volume à transporter. Toutefois, le broyat devra être transporté chaque jour en pépinière pour ne pas perdre l'humidité du matériel. Il serait souhaitable que les fragments aient une dimension de 1 à 2 cm permettant ainsi un bon compostage et des caractéristiques physiques optimales pour le substrat de croissance (photo 3.1c).

4. Mise en andain et utilisation du nitrate d'ammonium

Après le broyage, il faut mettre la biomasse en andain. Les dimensions recommandées pour la formation des andains sont de 1,5 m de largeur par 1,5 m de hauteur. La longueur est déterminée par la dimension de la dalle de compostage. La biomasse doit être homogène (débris de feuillage et de branches ligneuses), sinon il est préférable de bien mélanger les deux constituants.

La connaissance de la quantité du broyat permet de déterminer avec exactitude la quantité du nitrate d'ammonium à ajouter et d'évaluer les rendements quotidiens de production de broyat. Lors de la mise en andain, le broyat est ajouté par couches successives de 20 cm d'épaisseur afin de faciliter l'édification des andains, son humidification et l'ajout du nitrate d'ammonium (nom vernaculaire : ammonitre). Une couche de 20 cm d'épaisseur représente un volume de 0,3 mètre cube par mètre linéaire d'andain.

L'utilisation du nitrate d'ammonium, en remplacement

aux boues des stations d'épuration, favorise le développement des microorganismes responsables de la dégradation de la biomasse. Pour chaque mètre cube de broyat d'Acacia ou d'écorce produit, il faut ajouter en moyenne 3,0 Kg de nitrate d'ammonium en deux applications. La première et la deuxième application seront respectivement effectuées lors de l'édification des andains et du premier retournement. Le nitrate d'ammonium est dilué dans une solution aqueuse (1,5 Kg/20 litres d'eau/m³). Cette solution est appliquée à l'aide d'un arrosoir lors des deux applications (édification & premier retournement). La quantité d'eau (20 litres) peut être ajustée en fonction de l'humidité du broyat et de la facilité d'application.

Le pépiniériste doit aussi humecter adéquatement et de façon homogène le matériel lors de l'édification des andains. L'humidité de l'andain devrait atteindre 50 à 70%. L'application d'une quantité importante d'eau peut provoquer la putréfaction et la disparition des microorganismes responsables du compostage.

Ces deux facteurs (azote et humidité) sont essentiels pour favoriser la multiplication des microorganismes et par conséquent la dégradation des polymères (cellulose, hémicellulose et lignine) et la diminution de la durée de compostage.

5. Retournement des andains

Le succès du compostage repose sur le suivi journalier de la température et de l'évolution de ce facteur en fonction des différentes phases de compostage (photo 3.1 e, figure 3.4). La température de l'andain constitue un indicateur fiable de la décomposition de la matière organique. La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre à sonde d'une longueur de 90 cm afin que la mesure soit représentative des différentes couches de l'andain. La température journalière sera la moyenne des températures mesurées toujours au même moment de la journée, à quatre ou à six endroits représentatifs de

l'andain. Pour réduire le degré de variabilité entre les mesures, il serait souhaitable de garder la même inclinaison du thermomètre, par exemple à un angle de 45°, lors de la prise des mesures car les températures sont très variables à l'intérieur de l'andain.

Pour accélérer le processus de décomposition de la matière organique (branches broyées, écorce, etc.), la température de l'andain doit être maintenue dans l'intervalle correspondant aux phases mésophile et thermophile (figures 3.1a et 3.4). Durant ces phases la dégradation est optimale. Lors de la phase thermophile, la température atteint un maximum et diminue par la suite. Lorsque la température diminue de 5 à 10 °C, le pépiniériste procède au retournement. Pour la biomasse d'Acacia, la température maximale peut facilement atteindre ou dépasser 70°C (photo 3.1 e) alors que celle des écorces ne dépasse pas 50°C. La température maximale chez les écorces est intimement liée à la durée de stockage et à la décomposition qui a eu lieu avant l'opération de compostage.

Plusieurs retournements devront être effectués avant que le compost atteigne un stade de maturité. Généralement, 5 à 7 retournements sur une période de 3 à 4 mois sont nécessaires pour atteindre une maturité du compost à base de branches d'Acacia broyées. La température maximale subit une diminution progressive en fonction des retournements jusqu'à atteindre ou se rapprocher des températures ambiantes lorsque le compost devient mature.

Lors des retournements, l'humidité du compost pourra être suivie à l'aide d'un simple examen de quelques échantillons pris au centre de l'andain. Si l'échantillon est sec (humidité faible), il ne libérera pas de gouttelettes d'eau une fois soumis à une pression de la main. Dans ces conditions, le compost doit être humecté pour atteindre l'humidité cible (50 - 70%). Le broyat de surface doit être incorporé au centre du nouvel andain. Celui-ci est généralement plus sec, moins chaud et moins décomposé, que la partie centrale.

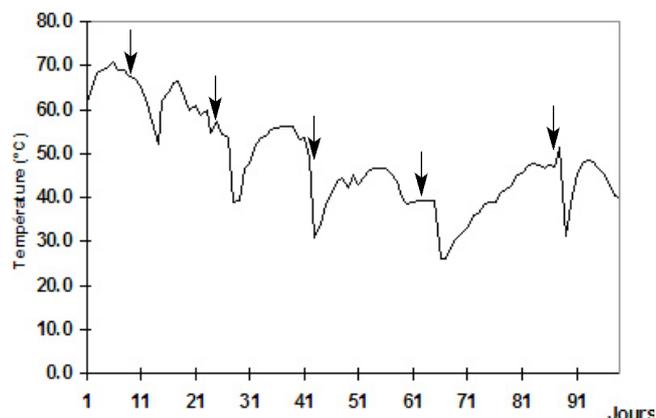


Figure 3.4 Exemple de suivi de l'évolution de la température à l'intérieur des andains de compost des branches d'Acacia cyanophylla Lindl broyées deux fois. Chaque point représente la moyenne de quatre mesures de température déterminées à l'aide d'un thermomètre à sonde de 90 cm de longueur. Les flèches indiquent les retournements effectués suivis généralement d'une augmentation de la température à l'intérieur des andains.

6. Test de maturité

Un compost mature et prêt à utiliser comme substrat de croissance ne devrait pas contenir de produits phénoliques qui peuvent affecter la germination des semences forestières. La réalisation de tests de germination en utilisant une quantité significative d'échantillons représentatifs du compost permet de s'assurer de la maturité de celui-ci. Ce test devrait être réalisé avant d'utiliser le substrat de croissance.

Le test de germination est très simple. Il consiste à faire germer des semences de légumineuses ou d'autres cultures (haricot, pois chiche, fève, lentilles, maïs, etc.) dans un conteneur dont les cavités sont remplies par du compost pur (photo 3.2). Le compost devra être humecté avant l'ensemencement des graines. L'arrosage devra être bien surveillé afin de maintenir une certaine teneur en eau du compost tout autour de chaque graine pour favoriser la germination. Une attention particulière devra être accordée aux quantités d'eau utilisées lors des arrosages afin d'éviter un environnement asphyxiant à la germination des semences. Pour chaque espèce, le nombre de semences utilisé pour la réalisation des essais de germination devrait varier entre 100 et 120. Il faut noter le nombre de jours nécessaires pour la

germination des semences et évaluer durant les deux premières semaines la croissance des plantules.

Par la suite, il sera possible d'évaluer le taux de germination, et les accroissements initiaux des plantules pour chacun des différents composts. Ainsi, une bonne germination des graines signifie que le compost est mûr, non toxique aux graines et il est prêt à être utilisé pour la production de plants forestiers.



Photo 3.2. Exemple de germination de lentilles dans des conteneurs remplis avec du compost pur d'*Acacia cyanopylla*. Les semences ont été recouvertes d'une couche de silice (Cliché : Lamhamedi).

7. Test de porosité

La porosité d'un compost ou d'un substrat de croissance représente les espaces qui ne sont pas occupés par les particules. Généralement, ces espaces sont occupés par l'eau et/ ou par l'air. Selon les cas, ils servent de lieu de stockage de l'eau d'irrigation nécessaire au plant pour s'alimenter et de l'air pour les échanges gazeux au niveau des racines. À l'aide d'un test de porosité, il est possible de quantifier le type d'espace et le volume disponible pour gérer ces deux éléments. Il est possible de déterminer trois types de porosité :

- la porosité totale (l'espace total n'étant pas occupé par la matière) ;
- la macro-porosité (les espaces majeures qu'occupe l'air) ;
- la micro-porosité (les espaces mineurs qu'occupe l'eau retenue par le compost ou le substrat).

L'objectif de ce test est d'évaluer le pourcentage de porosité des échantillons de compost afin de prendre des mesures appropriées pour obtenir un substrat de croissance avec une porosité optimale qui favorisera une bonne croissance des plants.

Le test de porosité se fait une fois que le compost est mature. Il est facile à réaliser et nécessite très peu de matériel. La personne qui le réalise doit faire preuve de rigueur tout en ciblant une bonne précision lors des mesures. Pour réaliser ce test, il est nécessaire d'avoir une bouteille de plastique de 1,5 litres avec bouchon et une tasse à mesurer. La bouteille doit être coupée à la moitié et être par la suite placée l'une dans l'autre, de façon à avoir la partie avec le bouchon vers le bas dans l'autre moitié de la bouteille. Par la suite, 500 ml d'eau doit être mesuré et mis dans la partie de la bouteille en entonnoir (avec le bouchon) et tracer une ligne indiquant la mesure exacte du 500 ml. Cette ligne sera le point de référence pour les différentes mesures des échantillons de compost et/ou de substrat.

Le compost ou le substrat à tester doit être complètement sec. Si le matériel n'est pas totalement sec, les valeurs obtenues seront erronées. Les étapes suivantes doivent être réalisées dans l'ordre :

Remplir la partie de la bouteille en entonnoir avec le matériel à tester jusqu'à la ligne préalablement marquée. Secouer modérément la bouteille pour obtenir la compaction du matériel similaire à celle d'un substrat en conteneur de culture. Si le matériel n'arrive pas directement sur la ligne, ajouter ou enlever ce qui est nécessaire (vérifier qu'il y a bien du matériel dans le bouchon de la bouteille) et égaliser la surface avec les doigts. Une bonne mise en place du matériel est importante pour l'obtention de valeurs exactes.

Remplir la tasse à mesurer avec 500 ml d'eau (Volume total du récipient - VT). Verser cette eau dans la section de la bouteille qui contient le matériel jusqu'à ce que l'eau apparaisse à la surface du matériel. Garder à part l'eau qui restera dans la tasse car elle sera nécessaire plus tard. Laissez l'eau dans la bouteille avec le matériel pendant approximativement une (1) heure afin de permettre à l'eau de bien pénétrer le compost ou le substrat.

Après une (1) heure, vérifier que l'eau est toujours au niveau de la surface, sinon ajouter de l'eau jusqu'à ce qu'elle apparaisse à la surface. Pour cette opération, utiliser l'eau qui restait dans la tasse à mesurer à l'étape antérieure.

Calculer la quantité d'eau totale utilisée pour saturer le matériel. Par exemple, s'il reste 275 ml d'eau dans la tasse à mesurer, la quantité d'eau utilisée est : $500 \text{ ml} - 275 \text{ ml} = 225 \text{ ml}$ (Volume d'eau utilisé pour saturer le substrat - VA). À ce moment, la tasse à mesurer peut être vidée.

Ouvrir le bouchon inférieur de la bouteille contenant le compost et permettre l'écoulement de l'eau dans le contenant du bas. Laissez égoutter pendant 10 minutes. Mesurer la quantité d'eau s'étant écoulée du substrat à l'aide de la tasse à mesurer : exemple 150 ml (Volume d'eau résiduelle - VR).

7.1 Évaluation de la porosité du compost ou du substrat

Pour évaluer la porosité du matériel, vous devez utiliser les trois paramètres mesurés précédemment:

- 1) Volume total du récipient (VT)
- 2) Volume d'eau nécessaire pour saturer le matériel (VA)
- 3) Volume d'eau recueilli par le drainage du matériel (VR)

Dans notre exemple, nous avons les valeurs suivantes:

$$VT = 500 \text{ ml} \quad VA = 225 \text{ ml} \quad VR = 150 \text{ ml}$$

Avec ces valeurs, les trois types de porosité peuvent être calculés:

$$\text{Porosité totale (PT)} = (VA \div VT) \times 100$$

$$\text{Macro porosité (Ma)} = (VR \div VT) \times 100$$

- espaces occupés par l'air -

$$\text{Micro porosité (Mi)} = PT - Ma$$

- espaces occupés par l'eau -

Avec les valeurs de notre exemple, les porosités calculées seraient:

$$PT = (VA \div VT) \times 100 = (225 \text{ ml} / 500 \text{ ml}) \times 100 = 45 \%$$

$$Ma = (VR \div VT) \times 100 = (150 \text{ ml} / 500 \text{ ml}) \times 100 = 30 \%$$

$$Mi = PT - Ma = 45 \% - 30 \% = 15 \%$$

Les valeurs de porosité recommandées pour l'obtention d'un substrat de croissance optimal sont approximativement:

$$\text{Porosité totale (PT)} \quad 50 - 60\%$$

$$\text{Macro porosité (Ma)} \quad 25 - 30\%$$

$$\text{Micro porosité (Mi)} \quad 20 - 25\%$$

Dans notre exemple, nous avons des valeurs un peu différentes des valeurs optimales. Premièrement, nous pouvons voir que la porosité totale est de 45%, la macro porosité de 30% et la micro porosité de 15%. Nous remarquons ici que la porosité est légèrement inférieure aux valeurs optimales en raison de la micro porosité qui est seulement à 15%, ce qui signifie que la micro porosité doit être augmentée avant que ce compost soit utilisé comme substrat de croissance.

7.2 Mélange pour le substrat de croissance

Quelles que soient les précautions prises pour obtenir un compost et des écorces uniformes, on obtient souvent des résultats différents des valeurs optimales d'un substrat de croissance. Afin de s'assurer que ces divers matériaux permettent d'obtenir un substrat final de qualité, il est nécessaire, avant de procéder à la fabrication du substrat de croissance, d'évaluer les proportions de compost et autres matériaux à utiliser pour optimiser à la fois la capacité de rétention en eau et l'aération du substrat final.

Il existe différentes méthodes permettant de modifier légèrement la porosité du substrat. Pour augmenter la micro porosité, ou diminuer la macro porosité, il est parfois possible de broyer à nouveau une certaine quantité de compost afin de réduire la grosseur des particules. Le broyage d'un compost grossier peut parfois amener à l'exposition de matières moins décomposées. L'utilisation de ce substrat pourrait provoquer une demande plus grande en azote lors des premières semaines de production en raison d'un manque de maturité d'une partie du compost.

Dans le cas d'un compost trop compact (i.e. avec une micro porosité et une macro porosité trop basse), nous pouvons faire l'ajout d'un aérateur. Il y a différents types d'aérateurs, notamment les écorces dont la disponibilité varie selon les régions.

L'ajout du compost des écorces de pin permet d'acidifier légèrement les substrats de croissance utilisés pour la culture de conifères. Pour les feuillus (essences forestières ou pastorales), on peut utiliser le compost pur comme substrat de croissance.

Il est recommandé, au cours des premières productions de compost et de substrat de croissance, de réaliser des analyses chimiques en laboratoire afin de caractériser ceux-ci. Ces analyses permettront de mieux connaître leurs propriétés et faciliteront l'élaboration du programme de fertilisation.

Conclusion

Le compostage des écorces des pins, des branches d'*Acacia cyanophylla* et de celles du maquis constitue une excellente solution de rechange à l'utilisation du terreau forestier ou agricole comme substrat de croissance. Le recours à l'ajout du nitrate d'ammonium, en remplacement aux boues des stations d'épuration, et l'utilisation des broyeurs dotés de « couteaux - marteaux » ont permis de raccourcir de façon significative la durée de compostage sans aucun effet sur la santé humaine et l'environnement.

Le suivi journalier de la température dans les andains permet aux pépiniéristes de mieux raisonner les retournements (oxygénation et humidification des andains) en vue d'optimiser la dégradation de la matière organique et la durée de compostage. En effet, selon

les modalités du broyage et la qualité de la matière à composter, la maturité du compost peut être atteinte après 3,5 mois de compostage. En Tunisie, les premiers travaux de compostage des branches de différentes essences forestières ont nécessité 16 à 24 mois pour atteindre la maturité.

Pour enlever les gros débris non compostés et avoir une bonne texture, le tamisage du compost s'avère nécessaire après maturation en vue d'avoir un substrat qui possède de bonnes caractéristiques physico-chimiques (capacité de rétention en eau, capacité d'échange cationique, etc.).

L'approche développée en matière de compostage depuis 1995, lors du démarrage du projet de modernisation des pépinières forestières, est actuellement utilisée à l'échelle opérationnelle dans les 16 pépinières forestières modernes de la Tunisie en vue de produire des plants forestiers, pastoraux et ornementaux. La disponibilité de la matière première, l'*Acacia*, a permis de développer un compost stable, standardisé et qui peut être répliqué à chaque période de production.

Chapitre 4

Irrigation des plants

Introduction

L'eau figure parmi les éléments importants qui affectent de façon significative les différentes phases de croissance des plants. Bien que les systèmes d'arrosage facilitent l'irrigation, la gestion de cette opération demeure sensible et complexe. Ce chapitre traite des besoins en eau selon les stades de croissance des plants, ainsi que les conséquences d'un manque ou d'un excès d'eau. De plus, diverses méthodes usuelles de contrôle de l'irrigation seront passées en revue.

1. Ressources en eau

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau en quantité suffisante et en qualité est souvent problématique. La provenance de l'eau peut être diverse soit principalement de puits, de rivières et de barrages. L'eau souterraine présente généralement une plus grande salinité surtout pendant la saison sèche. De plus, le débit d'eau est souvent insuffisant en saison sèche. Donc, avant l'installation d'une pépinière, l'étude de la qualité de l'eau ainsi que son débit potentiel tout au long d'une année s'avère essentielle.

L'eau est le facteur environnemental le plus important pour la croissance des plants. L'eau dans le substrat sert à dissoudre et à transporter les éléments minéraux pour la nutrition du plant. Pour les plantes ligneuses, l'eau a quatre principales fonctions :

- L'eau est un constituant essentiel du protoplasme de la plante. Le contenu en eau des cellules peut varier entre 10% pour les graines jusqu'à 95% pour les fruits et les jeunes feuilles ;
- L'eau est un dissolvant dans lequel les gaz, sels et solutions circulent entre les cellules de la plante ;
- L'eau est le principal réactif dans la photosynthèse et dans plusieurs autres processus d'hydrolyse ;
- L'eau assure la turgescence aux cellules c'est-à-dire qu'elle les maintient à la fois flexibles et rigides. Un certain degré de turgescence est nécessaire pour le développement des cellules, l'ouverture des stomates, le maintien de la forme des jeunes feuilles et des autres structures peu lignifiées.

Les qualités minérales et physiques de l'eau sont très importantes : pH, alcalinité, salinité, dureté et éléments en suspension. L'eau doit rencontrer des normes minimales de qualité. L'annexe 9 présente les normes acceptables de qualité de l'eau d'irrigation pour la culture des plants.

Puisque l'équilibre minéral de l'eau n'est pas constant, l'analyse minérale doit se faire au moins deux fois durant l'année, soit au début de la campagne et durant la saison sèche. Ces données permettent de considérer les éléments nutritifs présents dans l'eau au moment de la fertilisation. Cette analyse informe aussi de la salinité, de l'alcalinité, du pH, des particules et organismes en suspension. En Tunisie, l'eau est basique ($\text{pH} > 7$), souvent très chargée en sels (conductivité électrique $> 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$), en calcium et en sulfates. Dans un substrat très chargé en sels minéraux, la capacité du plant à absorber l'eau diminue, d'où un plus grand risque de flétrissement.

Certaines analyses telles que le pH, la conductivité et l'alcalinité peuvent être faites à la pépinière avec de petits appareils simples :

- Le pH est mesuré avec un pH-mètre ;
- La conductivité est mesurée avec un salinimètre (ou conductivimètre) ;
- L'alcalinité est mesurée avec un ensemble de détection par colorimétrie.

La conductivité de l'eau est la mesure de la quantité totale d'ions en solution dans l'eau d'irrigation et est généralement exprimé en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Lorsque le pH de l'eau est supérieur à 6,5, l'efficacité de certains pesticides peut être grandement diminuée. L'hydrolyse alcaline est responsable de ce phénomène. En Tunisie, l'alcalinité de l'eau est souvent très élevée (400 ppm HCO_3^-). On définit l'alcalinité comme la mesure de la capacité de l'eau à neutraliser les acides. Les carbonates et bicarbonates sont les principaux éléments de l'alcalinité de l'eau. La mesure de l'alcalinité peut s'exprimer sous différentes unités : soit le carbonate de calcium (CaCO_3), soit le bicarbonate (HCO_3^-), exprimée en milliéquivalent par litre (meq/L).

Équivalence des unités de mesure :

$1 \text{ meq/L} = 50 \text{ ppm CaCO}_3 = 61 \text{ ppm HCO}_3^-$

Lorsqu'on utilise une eau à forte alcalinité, le pH du substrat a tendance à augmenter. Ce phénomène peut rendre certains éléments nutritifs moins disponibles pour la plante. En Tunisie, l'alcalinité élevée de l'eau réduit la disponibilité de certains éléments tels que le fer et le manganèse par exemple.

Finalement, l'eau est souvent très chargée en sels minéraux et en éléments en suspension. Le système de filtration permet d'intercepter les particules en suspension et évite ainsi l'usure prématurée de certaines pièces d'irrigation, notamment les buses.

2. Besoins en eau selon les stades de croissance

La quantité d'eau nécessaire pour le plant est fonction de plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques, le volume des cavités du récipient, la capacité de rétention d'eau du substrat, l'espèce et la dimension des plants. Ce besoin en eau dépend aussi des stades de croissance des plants soit : phase de germination, phase de croissance active et phase d'endurcissement.

2.1 Phase de germination

C'est une période critique durant laquelle l'arrosage doit être léger et fréquent. Il n'est pas nécessaire de saturer le substrat. Il suffit de maintenir très humides les premiers centimètres en surface. Parfois, deux à trois arrosages courts par jour peuvent être nécessaires selon les conditions d'assèchement. Les pertes en eau se font surtout par évaporation en surface.

L'uniformité de l'arrosage doit être assurée sinon la germination sera déficiente et les cavités sans semis seront nombreuses. Les conteneurs situés en bordure doivent être particulièrement surveillés parce qu'ils sèchent plus rapidement.

2.2 Phase de croissance active

C'est une période durant laquelle l'arrosage doit être optimal afin d'obtenir la croissance espérée des plants. Les pertes en eau se font surtout par la transpiration des plants. En utilisant une charte d'humidité spécifique à

chaque pépinière, le pépiniériste fait osciller le pourcentage d'humidité moyen du substrat généralement entre 50% et 75% (voir annexes 10-A et 10-B). Toutefois, ces pourcentages d'humidité suggérés varient selon les particularités du substrat (texture et nature des constituants) et le micro-climat de chacune des pépinières. Chaque pépinière doit construire sa propre charte d'humidité au début de chaque campagne.

Entre chaque arrosage, la surface du substrat doit sécher afin de mieux contrôler l'apparition des mauvaises herbes, des algues et des problèmes phytosanitaires. Le pépiniériste doit toujours se méfier de l'assèchement en bordure et corriger par des arrosages manuels si nécessaire. Par temps très chaud, un arrosage bien calculé permet de rafraîchir les plants et d'éviter des dommages dus à un excès de chaleur.

Un lessivage des cavités à toutes les deux semaines permet d'abaisser la salinité du substrat et d'uniformiser l'humidité des conteneurs

2.3 Phase d'endurcissement

C'est une période où la fréquence des arrosages est diminuée. La hauteur visée des plants est alors presque atteinte. Le jardinier arrose à saturation dès que le pourcentage d'humidité moyen s'abaisse à 40%. Toutefois, ce pourcentage-cible peut varier selon les particularités du substrat et le micro-climat de la pépinière.

Ce régime d'arrosage va stimuler la croissance des racines ainsi que la résistance à la sécheresse. Entre chaque arrosage, la surface du substrat doit être séchée.

3. Effets du stress hydrique sur la croissance et la physiologie des plants (zones semi-arides)

Un stress hydrique affecte presque tous les aspects morphologiques et physiologiques du plant. Ce stress cause une sénescence prématurée des feuilles. Ce phénomène débute à la marge et à la pointe des feuilles où apparaît une chlorose et/ou une nécrose. Cette sénescence affecte les plus vieilles feuilles en premier

Le stress hydrique rend généralement les plantes plus susceptibles aux attaques des insectes et aux maladies et cause une diminution de la croissance, surtout l'arrêt de la croissance en hauteur. Le stress hydrique devient un outil pour contrôler la hauteur des feuillus par exemple. Toutefois, la réduction excessive de l'arrosage peut empêcher d'atteindre les standards morphologiques et physiologiques requis.

Un arrosage déficient cause une diminution générale de la croissance, une augmentation de la salinité du substrat, et le flétrissement du plant. Le pépiniériste doit surveiller rigoureusement l'humidité des récipients situés en bordure à cause du risque de flétrissement plus élevé de ces plants.

La réduction contrôlée de l'arrosage favorise l'endurcissement des plants avant la plantation.

4. Effets d'excès d'eau sur la croissance et la physiologie des plants

Dans le contexte où l'opération d'arroser est devenue facile avec le système d'asperseurs, l'arrosage excessif devient l'erreur la plus fréquente des pépiniéristes avec comme conséquence des pertes de croissance parfois importantes. Cette situation s'explique par le fait qu'en période de grande chaleur le pépiniériste craint le dessèchement rapide du substrat suivi par un flétrissement du plant.

Un excès d'arrosage cause un manque d'oxygénation dans le substrat, un risque de pourriture des racines et un lessivage des éléments nutritifs. Pour assurer une croissance optimale, le système racinaire a besoin à la fois d'oxygène, d'eau et d'éléments nutritifs. En l'absence d'oxygène, les racines ne peuvent pas absorber efficacement l'eau et les éléments nutritifs.

Les plants soumis à un excès d'eau peuvent présenter différents symptômes, notamment le flétrissement du feuillage, la diminution de la vigueur de la plante, la chlorose du feuillage, la nécrose du feuillage et la mort des tissus, ainsi que la pourriture des racines. L'ampleur des dommages dépend de la tolérance à l'excès d'eau de l'espèce cultivée. Les dommages sont aussi fonction de la durée de cet excès d'eau.

Le maintien des teneurs en eau élevées favorise la formation de racines de gros diamètre, dépourvues de poils absorbants, qui deviennent généralement non fonctionnelles en matière d'absorption d'eau et d'éléments nutritifs après plantation. Ces conditions humides peuvent prolonger la croissance active du plant, retarder le délai de formation des bourgeons, inhiber le déroulement des différentes phases subséquentes de dormance nécessaires à la résistance aux différents stress environnementaux et affecter la performance des plants sur le site de reboisement.

Du point de vue environnemental, les arrosages trop abondants causent un lessivage des éléments minéraux et par conséquent une pollution de la nappe phréatique. De plus, les excès d'arrosage causent un gaspillage d'eau et d'énergie. Dans des zones semi-arides où les risques de pénurie sont élevés, la ressource eau doit être gérée de façon optimale.

Du point de vue phytosanitaire, un excès d'arrosage occasionne la prolifération des algues, des mousses et des mauvaises herbes dans les conteneurs et sur le site de culture. Il entraîne aussi une augmentation des risques de propagation de pathogènes et d'insectes.

Un arrosage trop abondant en fin de saison nuit à l'endurcissement des plants face à la sécheresse. Cet endurcissement est obligatoire dans des zones semi-arides afin d'assurer une bonne performance en plantation.

5. Méthodes de contrôle de l'irrigation en pépinière

Le pépiniériste doit assurer le contrôle et l'optimisation de l'irrigation tout en réduisant le lessivage des éléments minéraux. Avec un nouveau système de culture hors-sol en conteneur et un nouveau substrat, le pépiniériste a besoin d'outils pour décider du moment et de la durée de l'arrosage. L'objectif du pépiniériste est d'arroser au bon moment et d'appliquer seulement la quantité d'eau nécessaire.

La prise de décision en matière d'irrigation peut

s'appuyer sur différentes méthodes, notamment le tensiomètre, le psychromètre, les blocs de gypse, la sonde à neutron, la chambre à pression, le MP-917, la méthode tactile jumelée au jugement et par la méthode gravimétrique. Ces deux dernières sont les plus employées. La description de quelques méthodes est présentée dans le texte qui suit et l'accent est mis sur la méthode gravimétrique.

5.1 Méthode gravimétrique: la méthode la plus utilisée

Cette méthode consiste à déduire l'humidité du substrat à partir du poids des conteneurs en culture. C'est une méthode objective et simple d'application qui permet au pépiniériste sans expérience de décider du moment et de la durée d'arrosage. C'est l'une des méthodes les plus utilisées dans les pépinières.

Le principe de la méthode gravimétrique est simple : suite à un arrosage le substrat perd de l'eau (donc du poids) surtout par l'évaporation et la transpiration du plant; lorsque le poids moyen des conteneurs mesurés atteint un seuil prédéterminé, les plants doivent être arrosés.

À l'aide d'une balance à plateaux (capacité 5 kg) et d'une charte d'humidité, le pépiniériste pèse plusieurs conteneurs représentatifs par secteur à évaluer. La moyenne des poids est ensuite traduite en pourcentage d'humidité (%HUM) sur la charte d'humidité. Les annexes 10-A et 10-B présentent des exemples de charte d'humidité. Ce pourcentage est l'élément clé de décision pour l'arrosage. Par sa simplicité d'interprétation, cette méthode offre au pépiniériste une bonne autonomie d'action.

Cette méthode nécessite la confection d'une charte d'humidité qui établit la correspondance entre le poids total du conteneur et l'humidité du substrat. Chaque pépinière doit élaborer sa propre charte étant donné les différences entre les substrats, les densités à l'empotage et les quantités de gravier appliquées en surface. Le poids pesé inclut le conteneur avec le substrat et le gravier de silice. Pendant la saison, il faudra corriger la charte régulièrement en ajoutant le poids du plant en croissance.

Pour la pesée des conteneurs certaines conditions

doivent être respectées à savoir :

- peser les conteneurs au maximum deux heures avant d'arroser;
- échantillonner un nombre suffisant de conteneurs à peser;
- sélectionner les conteneurs à peser de façon systématique dans le secteur;
- éviter d'utiliser les mêmes conteneurs pour la pesée.

Afin de connaître le rapport entre le temps d'arrosage et l'augmentation de l'humidité du substrat, le pépiniériste a intérêt à construire une charte d'arrosage adaptée aux conditions de la pépinière (annexe 11). Cet outil permet au pépiniériste de gérer plus précisément les arrosages. Il peut ainsi prévoir le nombre de minutes d'arrosage nécessaires pour augmenter d'un certain pourcentage l'humidité du substrat. Cette charte peut gérer aussi l'apport de l'eau de pluie. Il suffit d'enregistrer les données en millimètre d'eau à l'aide d'un pluviomètre situé près du site de culture et de faire la correspondance en minutes d'arrosage.

Le pépiniériste doit utiliser la méthode gravimétrique avec discernement. Étant donné que le système d'arrosage par asperseurs n'est pas parfaitement uniforme, certains conteneurs reçoivent moins d'eau. Ces plants font face à un danger de flétrissement s'ils ne sont pas pris en charge. La vigilance du pépiniériste doit être soutenue tout au long de la campagne. Par exemple, l'arrosage manuel des conteneurs situés en bordure des surfaces cultivées permet de corriger leur humidité et permet du même coup d'éviter un arrosage excessif dans le centre de ces surfaces.

Comme les décisions d'arrosage sont influencées par les conditions climatiques, par la synchronisation avec les fertilisations et les opérations, par le contrôle des mauvaises herbes et par l'effet de bordure, il faut voir la méthode gravimétrique comme un des outils de gestion de l'humidité des substrats de culture. Le jugement du pépiniériste, qui est basé sur son expérience et sur les conditions particulières de la pépinière, demeure primordial dans la prise de décision pour l'arrosage.

Pour le moment, la méthode gravimétrique s'avère la méthode de contrôle la mieux adaptée pour la gestion de l'arrosage dans les pépinières forestières en Tunisie.

5.2 Méthode par chambre à pression

Cette méthode permet de mesurer le statut hydrique (niveau de stress) d'un plant. C'est une mesure du potentiel hydrique interne de la plante.

La méthode consiste à couper une ramille et à la placer dans une chambre à pression avec le bout coupé à l'extérieur de la chambre. La pression de l'air dans la chambre est augmentée jusqu'à ce que l'eau commence à sortir par le bout coupé. À ce moment précis, la pression dans la chambre est mesurée. Plus cette mesure de pression est élevée, plus le besoin d'arrosage est grand. Toutefois, l'humidité relative de l'air influence ces résultats : plus l'humidité est grande et plus la pression dans la chambre sera élevée.

Cette méthode est précise mais difficile à traduire comme outil de gestion quotidien. Le jardinier doit recevoir une formation sur l'utilisation des équipements. C'est une méthode destructive et non utilisable avec de très petits plants au début de la campagne. Toutefois, elle s'avère très utile pour vérifier la précision des autres méthodes de contrôle d'arrosage.

5.3 Réflectométrie dans le domaine temporel (Appareil MP-917)

Cette méthode permet de contrôler instantanément et avec grande précision la teneur en eau dans le substrat en utilisant une sonde à double diode. C'est un outil qui permet l'évaluation de la teneur en eau volumétrique en temps réel au niveau du substrat. C'est une méthode rapide, non-destructive, souple d'emploi mais coûteuse à l'achat.

5.4 Méthode tactile jumelée à l'expérience du jardinier

Cette méthode est la plus employée mais son succès est fonction de la compétence du jardinier. En effet, le jardinier expérimenté, en soulevant les conteneurs, tâtant la surface du substrat, et en extrayant les plants, est capable de décider du moment et de la durée de l'arrosage. Cette méthode est la plus employée, toutefois, elle ne pourra être utilisée que lorsque les jardiniers auront acquis plusieurs années d'expérience avec la culture hors-sol.

Pour le moment la méthode gravimétrique s'avère la méthode de contrôle la mieux adaptée pour la gestion de l'arrosage dans les pépinières forestières en Tunisie.

Conclusion

L'eau dans le substrat sert à dissoudre et à transporter les éléments minéraux pour la nutrition du plant. Un approvisionnement en eau en quantité suffisante et en qualité est un critère primordial dans le choix du site pour l'installation d'une pépinière.

Des outils de gestion et de contrôle sont nécessaires pour assurer l'optimisation de l'irrigation en fonction des besoins physiologiques des plants. Une bonne régie d'irrigation permet une croissance optimale, une réduction des problèmes phytosanitaires et un en durcissement adéquat des plants avant la plantation tout en réduisant le lessivage des éléments minéraux.

Fertilisation en pépinière forestière

Introduction

Le statut nutritionnel des plants, c'est-à-dire la concentration ou le contenu des différents éléments nutritifs, a un effet direct sur la croissance des parties aériennes et des racines tout au long des différentes phases de croissance des plants aussi bien en pépinière qu'en plantation. Après plantation, une déficience ou une concentration non optimale en certains éléments minéraux peut affecter négativement le taux de survie en site de reboisement. La déficience en éléments minéraux affecte négativement le fonctionnement de plusieurs processus physiologiques, ainsi que la croissance des plants (photosynthèse, croissance des racines, respiration, etc.) aussi bien en pépinière qu'en plantation.

Les substrats utilisés (compost d'Acacia et de maquis, écorces de pin, granules de liège, chamottes de brique, silice et sable) ont un rôle de support, mais pas d'apport en éléments minéraux essentiels à la croissance des plants. Ces substrats ne sont pas riches en éléments nutritifs et ne peuvent pas assurer les besoins lors des différentes phases de croissance des plants. La fertilisation est parmi les principales techniques culturales incontournables pour améliorer la qualité et contrôler la croissance des plants en pépinière forestière.

Lors de la première phase de modernisation des pépinières forestières, il s'est avéré que les exigences, les sensibilités et les réactions des plants résineux et feuillus étaient complètement différentes vis-à-vis des programmes de fertilisation. Les résineux ont des besoins en éléments minéraux plus élevés que ceux des feuillus. De plus, les résineux sont plus sensibles aux variations de pH du substrat à cause de leurs effets sur la disponibilité en éléments minéraux. À cet effet, la production de plants de qualité dans les pépinières forestières modernes en Tunisie nécessite un calibrage et une optimisation des programmes de fertilisation spécifiques aux différentes essences et ce, pendant plusieurs saisons de croissance. En plus de l'ajout d'acide pour diminuer le pH de l'eau d'irrigation, l'inoculation des plants résineux à l'aide de spores de champignons ectomycorhiziens a permis de corriger

certaines déficiences, notamment celle en fer. Ainsi, les premiers programmes de fertilisation et l'inoculation ectomycorhizienne des plants ont donné d'excellents résultats lors de l'installation des trois premières pépinières pilotes en 1995.

Les principaux objectifs de ce chapitre sont : i) mettre l'accent sur les principaux facteurs qui affectent la disponibilité des éléments nutritifs dans les substrats à base de compost produits dans les zones semi-arides; ii) faire un rappel des principaux éléments nutritifs, ainsi que leurs rôles physiologiques; et iii) élaborer des programmes de fertilisation spécifiques aux essences méditerranéennes.

1. Principaux facteurs affectant la disponibilité des éléments minéraux

L'optimisation de la fertilisation et de la disponibilité des éléments minéraux dans la rhizosphère, c'est-à-dire dans la zone racinaire, surtout dans les pépinières situées dans les zones semi-arides devront se faire en tenant compte de plusieurs facteurs essentiels, ainsi que de leurs interactions. Parmi ces facteurs, on peut citer :

- la qualité de l'eau d'irrigation (pH, carbonates et bicarbonates, etc.) ;
- les propriétés physico-chimiques du substrat (texture, pH, capacité d'échange cationique ou CEC, porosité, capacité de rétention en eau, aération, teneur en eau du substrat, etc.) ;
- les différentes phases de croissance des plants spécifiques à chaque essence (standards de croissance et besoins spécifiques de chaque essence en fertilisants) ;
- le lessivage engendré par l'irrigation et par les précipitations (pertes en éléments nutritifs et possibilités de contamination de la nappe phréatique) ; et
- le coût des fertilisants.

2. Éléments nutritifs essentiels et modalités de diagnostic

En matière de nutrition minérale, 13 éléments nutritifs sont considérés comme éléments essentiels à la croissance des plants. On distingue des macro-éléments et des micro-éléments (tableau 5.1). Chaque élément nutritif a un rôle spécifique (tableau 5.2) et qui ne peut pas être assuré par un autre élément. Chaque élément a aussi un effet direct sur la croissance et les processus

Tableau 5.1. Éléments nutritifs essentiels

| Élément | Symbole chimique | % du poids sec du plant | Poids atomique | Poids équivalent |
|-----------------------|---|-------------------------|----------------|------------------|
| Macro-éléments | | | | |
| Azote | N | 1.5 | 14.0 | 4.7 |
| Nitrate | NO ₃ ⁻ | - | 62.0 | 62.0 |
| Ammonium | NH ₄ ⁺ | - | 18.0 | 18.0 |
| Phosphore | P | 0.2 | 31.0 | 10.3 |
| Phosphate | H ₂ PO ₄ ⁻ | - | 97.0 | 97.0 |
| Potassium | K | 1.0 | 39.1 | 39.1 |
| Calcium | Ca | 0.5 | 40.1 | 20.0 |
| Magnésium | Mg | 0.2 | 24.3 | 12.2 |
| Soufre | S | 0.1 | 32.1 | 8.0 |
| Sulfate | SO ₄ ²⁻ | - | 96.0 | 48.0 |
| Micro-éléments | | | | |
| Fer | Fe | 0.01 | 55.8 | 18.6 |
| Manganèse | Mn | 0.005 | 54.9 | 27.5 |
| Zinc | Zn | 0.002 | 65.4 | 32.7 |
| Cuivre | Cu | 0.0006 | 63.6 | 31.8 |
| Bore | B | 0.002 | 10.8 | 3.6 |
| Chlore | Cl | 0.01 | 35.5 | 35.5 |
| Molybdène | Mo | 0.00001 | 96.0 | 32.0 |

Tableau 5.2. Principales fonctions physiologiques des éléments nutritifs essentiels et les concentrations approximatives souhaitées en fin de saison de croissance (mg / Kg du poids sec du feuillage)

| Élément | Principales fonctions physiologiques | Concentration (mg / Kg) |
|----------------|---|--------------------------------|
| N | Constituant des acides aminés, des enzymes, des acides nucléiques, des chlorophylles et des hormones des plantes | 15 |
| P | Transfert d'énergie, constituant des acides nucléiques, des nucléoprotéines, des phospholipides et des sucres phosphorylés | 2 |
| K | Synthèse des protéines, l'activité des enzymes, translocation et maintien des relations hydriques via le contrôle stomatique | 10 |
| Ca | Perméabilité des membranes, constituant des lamelles | 5 |
| Mg | Constituant des chlorophylles, co-facteur de plusieurs enzymes, activation des enzymes de photosynthèse (RuBPC: ribulose biphosphate carboxylase) | 2 |
| S | Constituant de certains enzymes et protéines, réactions de décarboxylation | 1 |
| Fe | Constituant des enzymes du hème, présent dans les chloroplastes, la déficience engendre une diminution du taux de la photosynthèse nette et de la respiration | 100 |
| Cl | Nécessaire pour l'évolution de l'oxygène dans les processus de photosynthèse | 100 |
| Mn | Activation des enzymes d'oxydation, transport des électrons impliqués dans la photosynthèse, la déficience affecte la structure des chloroplastes | 50 |
| B | Synthèse de l'uracile (composante de l'ARN), influence la concentration des régulateurs de croissance et la translocation des sucres | 20 |
| Zn | Rôle de liaison dans les enzymes, métabolisme de l'azote, synthèse des auxines | 20 |
| Cu | Constituant des enzymes d'oxydation intervenant dans la réduction de l'oxygène, constituant de substances de la chaîne de transport des électrons de la photosynthèse | 6 |
| Mo | Rôle dans la réduction des nitrates | 0.1 |

métaboliques. L'omission d'un élément peut retarder les différentes phases de croissance ou entraîner la mort prématurée des semis.

Il existe une relation très étroite entre la concentration foliaire ou le contenu d'un élément nutritif dans tout le plant et la croissance des plants (figure 5.1). Lorsque la concentration est faible, la croissance des plants n'est pas optimale et les symptômes de déficience sont apparents. Ces symptômes sont spécifiques à chaque élément et peuvent varier selon les essences feuillues ou résineuses. Malgré la variation considérable en termes de symptômes de déficience pour un même élément, l'utilisation de ces symptômes peut faciliter l'élaboration du premier diagnostic. Les causes d'une déficience ne peuvent être déterminées d'une façon précise que par une analyse foliaire. À une concentration optimale, la croissance est maximale et l'ajout d'un fertilisant ne se traduit pas nécessairement par une augmentation de la croissance, ce qui indique que le plant est en consommation de luxe. L'ajout supplémentaire de fertilisants à cette phase signifie que le pépiniériste augmente le coût de la fertilisation sans aucun effet majeur sur la croissance des plants. À une concentration très élevée, l'élément nutritif peut même devenir toxique, ce qui se traduit par un effet dépressif sur la croissance des plants.

En plus de la description des symptômes et du diagnostic foliaire, une connaissance approfondie des propriétés physico-chimiques des substrats (pH, CEC, porosité, fertilité, salinité, etc.) à base de compost s'avère nécessaire en vue de mieux optimiser la fertilisation. Après la germination des graines, surtout celles des résineux dans ce genre de substrat, les semis peuvent montrer une chlorose ou un faible taux de croissance entre deux semaines successives malgré un apport de fertilisants. Cette déficience est due en grande partie à la coïncidence de cette phase de croissance avec la période dépressive des nitrates. Cette période peut durer longtemps si le pépiniériste n'intervient pas et elle est fonction du ratio C/N, des conditions environnementales au niveau de la rhizosphère et de l'importance de l'apport en azote. Une fertilisation adéquate et bien raisonnée en azote raccourcit significativement la durée de la période d'immobilisation de l'azote. La bonne couleur des aiguilles et l'amélioration substantielle de la croissance (1 cm/ semaine), par exemple chez les pins et chez les cyprès, ne peuvent être observées que par une augmentation de la fertilité du substrat.

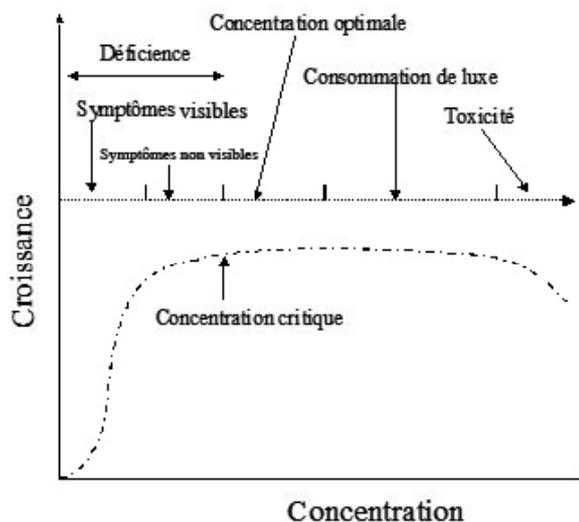


Figure 5.1. Relations entre la croissance et l'augmentation de la concentration en éléments nutritifs dans le plant. L'augmentation de la croissance peut être observée jusqu'à une concentration critique au-dessus de laquelle la croissance du plant n'est plus limitée par la fertilisation. Ceci se traduit par une consommation de luxe et possiblement par une toxicité.

3. Caractéristiques des fertilisants

Chaque fertilisant a ses caractéristiques spécifiques en terme de contenu en éléments nutritifs. Par exemple, lorsque vous achetez un fertilisant 20-20-20 c'est-à-dire qu'il contient 20% d'azote (N), 20 % de phosphore (P_2O_5) et 20% de potassium (K_2O). Donc, pour déterminer le pourcentage réel du phosphore et du potassium, le pépiniériste doit utiliser les facteurs de conversion suivants (tableau 5.3) :

| Pour convertir la forme A | À la forme B | Multiplier par |
|---------------------------|--------------|----------------|
| P_2O_5 | P | 0.4364 |
| P | P_2O_5 | 2.291 |
| K_2O | K | 0.8301 |
| K | K_2O | 1.205 |

Tableau 5.3: Facteurs de conversion utilisés dans le calcul des éléments nutritifs.

Les concentrations des éléments nutritifs peuvent être exprimées en ppm, en meq/L et en mole/L (annexe 12).

Par ailleurs, il s'avère nécessaire de tenir compte de la salinité engendrée par les fertilisants choisis. Les besoins en éléments nutritifs devront être raisonnés en fonction des phases de croissance spécifiques à chaque essence tout en tenant compte des ratios cationiques et anioniques, et de celui des éléments nutritifs (tableaux 5.4 et 5.5).

Tableau 5.4 : Pourcentages recommandés des anions et des cations dans une solution universelle de nutrition minérale

| | |
|--|------------|
| Pourcentage des anions totaux | |
| Nitrate (NO ₃ ⁻) | 50-70% |
| Phosphate (H ₂ PO ₄ ⁻) | 3-20% |
| Sulfate (SO ₄ ²⁻) | 25-45% |
| Pourcentage des cations totaux | |
| Potassium (K ⁺) | 30-40% |
| Calcium (Ca ²⁺) | 35-55% |
| Magnésium (Mg ²⁺) | 15-30% |
| Ratios spécifiques de certains ions | |
| NO ₃ ⁻ : H ₂ PO ₄ ⁻ : SO ₄ ²⁻ | 60 :5 :35 |
| K: Ca ²⁺ : Mg ²⁺ | 35 :45 :20 |

Tableau 5.5 : Ratios à maintenir entre les différents éléments nutritifs dans une solution de fertilisation

| Élément | Ratio de l'élément nutritif | Niveaux de Concentrations | |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|---------|
| | | 100 ppm | 200 ppm |
| Macro-éléments | | | |
| N | 1.00 | 100 | 200 |
| P | 0.30 | 30 | 60 |
| K | 0.50 | 50 | 100 |
| Ca | 0.04 | 4 | 8 |
| Mg | 0.05 | 5 | 10 |
| S | 0.09 | 9 | 18 |
| Micro-éléments | | | |
| Fe | 0.007 | 0.7 | 1.4 |
| Mn | 0.004 | 0.4 | 0.8 |
| Zn | 0.0003 | 0.03 | 0.06 |
| Cu | 0.0003 | 0.03 | 0.06 |
| Mo | 0.00007 | 0.007 | 0.014 |
| B | 0.002 | 0.2 | 0.4 |
| Cl | 0.0003 | 0.03 | 0.06 |

4. Qualité de l'eau d'irrigation et déficience en fer

Dans les zones semi-arides et arides, l'eau d'irrigation dans la plupart des pépinières se caractérise par une salinité élevée, un pH basique et une alcalinité élevée. L'alcalinité reste le facteur qui engendre l'augmentation du pH du substrat de croissance, mais pas le pH de l'eau d'irrigation. L'alcalinité se réfère à la capacité tampon de l'eau d'irrigation lui permettant de résister à toute diminution de pH. Une alcalinité élevée signifie que la diminution du pH ne peut se faire que par l'addition d'une grande quantité en acide. L'alcalinité est mesurée en mg/L du carbonate de calcium (CaCO₃). La source de l'alcalinité est généralement causée par les ions bicarbonates (HCO₃⁻) et carbonates (CO₃²⁻). Ces deux composés pourront causer une augmentation du pH au niveau du substrat de croissance s'ils existent en quantités suffisantes. Suite à l'irrigation avec une eau chargée en bicarbonates, le calcium et le magnésium se lient à ces ions pour former carbonate de magnésium et de calcium. Ces deux sels insolubles ne se lessivent pas facilement du substrat. Avec une fréquence élevée d'irrigation, le calcium et le magnésium s'accumulent dans le substrat lors de son dessèchement et augmentent facilement le pH (pH>7). Les pH élevés affectent la disponibilité du zinc, du fer et du manganèse et induisent des déficiences apparentes en ces oligo-éléments malgré leur ajout dans les programmes de fertilisation. Le volume faible du substrat contenu dans chaque cavité fait que l'augmentation du pH est plus rapide dans les récipients que dans les sols. Le taux d'augmentation du pH dépend de la composition du substrat et les régies d'irrigation et de fertilisation. Le point le plus important est que le pH élevé de l'eau d'irrigation ne peut pas induire une augmentation du pH du substrat lors de la saison de croissance, mais c'est plutôt l'alcalinité de l'eau qui engendre cette augmentation du pH. Les eaux d'irrigation dans les pépinières qui contiennent moins de 50 mg/L en bicarbonates n'engendrent pas généralement un effet marqué sur le pH.

Les déficiences périodiques en fer observées chez les semis peuvent être dues à plusieurs facteurs, principalement la concentration élevée en carbonates, l'excès d'eau lors des irrigations, le pH élevé de l'eau d'irrigation et du substrat. Ces déficiences sont observées vers la fin de la saison de croissance, et ce dès la mi-août. Elles se caractérisent par une chlorose au niveau des jeunes aiguilles de l'apex (photo 5.1). Si la déficience devient sévère, les aiguilles de l'apex deviennent blanches non photosynthétiques. Cette étape

est suivie par le dessèchement et la mort de l'apex. La fréquence des plants ayant ces symptômes peut augmenter si le pépiniériste n'intervient pas à l'avance (acidification, lessivage des sels et mycorhization).

Une concentration en bicarbonates supérieure à 50 mg/L s'accompagne d'une augmentation appréciable de pH et nécessite une acidification. **Lorsque l'injection d'acide est nécessaire, utiliser des gants et des lunettes de protection et ajouter toujours l'acide à l'eau, mais jamais l'eau à l'acide.** Cette injection d'acide peut modifier la solubilité des oligo-éléments dans l'eau. Par conséquent, il s'avère nécessaire d'analyser l'eau après injection de l'acide afin de confirmer les concentrations visées par le programme de fertilisation. La solubilité et la disponibilité de plusieurs éléments sont affectés par le pH du substrat. Par exemple, les effets immédiats d'une acidification sont l'augmentation de la solubilité de plusieurs éléments (calcium, magnésium, sodium, phosphore, zinc, manganèse, bore, lithium, cuivre, fer, nickel, etc.).



5. Exemple de calcul des quantités de fertilisants

La première étape de calcul du mélange de fertilisants est de déterminer la quantité d'acide phosphorique (54 %) à ajouter pour baisser le pH de l'eau d'irrigation à 5,5. Malgré que les plants soient capables de tolérer des variations de pH, il s'est avéré que les résineux nécessitent un pH autour de 5,5 tandis que les feuillus préfèrent un pH élevé de l'ordre de 6,5. Les problèmes de déficience rencontrés dans les pépinières modernes de la Tunisie sont plus marqués chez les résineux que chez les feuillus. Supposons que nous avons opté pour l'acide phosphorique (54%) et que 0,1 mL est nécessaire pour baisser le pH de l'eau d'irrigation à 5,5. Cette quantité est déterminée à partir de la courbe de titration [pH= f(quantité de l'acide phosphorique)]. Ces courbes de titration devraient être déterminées par un laboratoire spécialisé.

Première étape : calcul des concentrations à utiliser

1 Litre de H_3PO_4 (50 %) correspond à une acidité de 667,5 (g/L) = acidité (tableau 5.6)

1 Litre de H_3PO_4 (55 %) correspond à une acidité de 758,5 (g/L)

d'où une différence de 5% correspond à 91 (g/L) alors que 4 % correspond à 72.8 (g/L).

Donc 1 Litre de H_3PO_4 (54 %) correspond à une acidité de 740.3 (g/L) (tableaux 5.6 et 5.7) d'où $x = 74$ mg

L'acide phosphorique contient 32% de P (tableau 5.6), donc :

$74 \text{ mg/L} \times 0,32 = 23,68 \text{ ppm} = 24 \text{ ppm P}$

NPK : 11-40-11

Il manque 30 ppm du phosphore :

$68.74 \text{ ppm} (P_2O_5) \times 0.4364$ (facteur de conversion) = 30 ppm P

$171,49 \text{ mg/L} \times 0.4 = 68,74 \text{ ppm } P_2O_5$

Cette quantité de 171,49 mg/L contient de l'azote et du potassium

$171.49 \text{ mg/L} \times 0.11 = 18.90 \text{ ppm N}$

$171.49 \text{ mg/L} \times 0.11 = 18.90 \text{ ppm de } K_2O$

$18,9 \times 0,830$ (facteur de conversion) = 15,69 ppm K

Photo 5.1. Ces trois photos montrent en (a) l'apparition des premiers symptômes de déficience en fer, en (b) l'augmentation de la déficience des plants si le pépiniériste n'optimise pas ses programmes de fertilisation tout au long de la saison de croissance et en (c) un contrôle parfait et une absence de ces symptômes de déficience (Clichés : Lamhamedi).

Tableau 5.6: Relation entre le pourcentage d'acide (%) et la concentration de l'acide phosphorique

| Pourcentage d'acidité (%) | Concentration (g/L) | Pourcentage d'acidité (%) | Concentration (g/L) |
|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| 1 | 10,04 | 40 | 501,60 |
| 2 | 20,18 | 45 | 581,90 |
| 4 | 40,80 | 50 | 667,50 |
| 6 | 61,85 | 55 | 758,50 |
| 8 | 83,36 | 60 | 855,60 |
| 10 | 105,30 | 65 | 958,80 |
| 12 | 127,80 | 70 | 1068,00 |
| 14 | 150,70 | 75 | 1184,00 |
| 16 | 174,10 | 80 | 1306,00 |
| 18 | 198,10 | 85 | 1436,00 |
| 20 | 222,70 | 90 | 1571,00 |
| 22 | 247,80 | 92 | 1628,00 |
| 24 | 273,50 | 94 | 1686,00 |
| 26 | 299,80 | 96 | 1746,00 |
| 28 | 326,60 | 98 | 1807,00 |
| 30 | 354,20 | 100 | 1870,00 |
| 35 | 425,60 | | |

Tableau 5.7: Composition chimique des fertilisants solubles en macro-éléments

| Fertilisant | Formule chimique | Solubilité (g/100 ml) | % de l'élément nutritif | | | | | | |
|------------------------|--|-----------------------|-------------------------|-------------------|----|----|----|----|----|
| | | | N-NH ₄ | N-NO ₃ | P | K | Ca | Mg | S |
| Nitrate d'ammonium | NH ₄ NO ₃ | 118 | 17 | 17 | - | - | - | - | - |
| Sulfate d'ammonium | (NH ₄) ₂ SO ₄ | 71 | 21 | - | - | - | - | - | 24 |
| Nitrate de calcium | Ca(NO ₃) ₂ | 102 | - | 15 | - | - | 17 | - | - |
| Phosphate diammonium | (NH ₄) ₂ HPO ₄ | 43 | 21 | - | 24 | - | - | - | - |
| Phosphate dipotassique | K ₂ HPO ₄ | 167 | - | - | 18 | 45 | - | - | - |
| Sulfate de magnésium | MgSO ₄ | 71 | - | - | - | - | - | 10 | 13 |
| Phosphate d'ammonium | NH ₄ H ₂ PO ₄ | 23 | 11 | - | 21 | - | 1 | - | 3 |
| Phosphate de potassium | KH ₂ PO ₄ | 33 | - | - | 23 | 28 | - | - | - |
| Acide nitrique | HNO ₃ | Nd | - | 22 | - | - | - | - | - |
| Acide phosphorique | H ₃ PO ₄ | 548 | - | - | 32 | - | - | - | - |
| Carbonate de potassium | K ₂ CO ₃ | 112 | - | - | - | 56 | - | - | - |
| Chlorure de potassium | KCl | 35 | - | - | - | 52 | - | - | - |
| Nitrate de potassium | KNO ₃ | 13 | - | 13 | - | 37 | - | - | - |
| Sulfate de potassium | K ₂ SO ₄ | 7 | - | - | - | 44 | - | - | 18 |
| Nitrate de sodium | NaNO ₃ | 73 | - | 16 | - | - | - | - | - |
| Acide sulfurique | H ₂ SO ₄ | Nd | - | - | - | - | - | - | 33 |
| Urée | CO(NH ₂) ₂ | 73 | 45 | - | - | - | - | - | - |

Nitrate de potassium (KNO_3) : 13-0-46

90 ppm - 15,69 = 74,31 ppm K

$(74,31 \text{ ppm} / 0,46) = 102,85 \text{ mg/L } (KNO_3)$

$102,85 \text{ mg/L de } KNO_3 \times 0,13 = 13,37 \text{ ppm N}$

Nitrate d'ammonium NH_4NO_3 (33.5 - 0 - 0)

180 ppm N - 30 ppm (eau) = 150 ppm N

$150 \text{ ppm N} - 13,37 - 18,90 = 117,73 \text{ ppm N}$ (soit : 58.87 ppm NH_4 et 58.87 ppm NO_3)

$117,73 \text{ ppm} : 0,335 = 351,43 \text{ mg/L}$

Sulfate de magnésium ($MgSO_4$)

40 ppm (mg/L) Mg : 0.1 = 400 mg/L

$400 \text{ mg/L} \times 0,13 = 2 \text{ ppm } SO_{42-}$

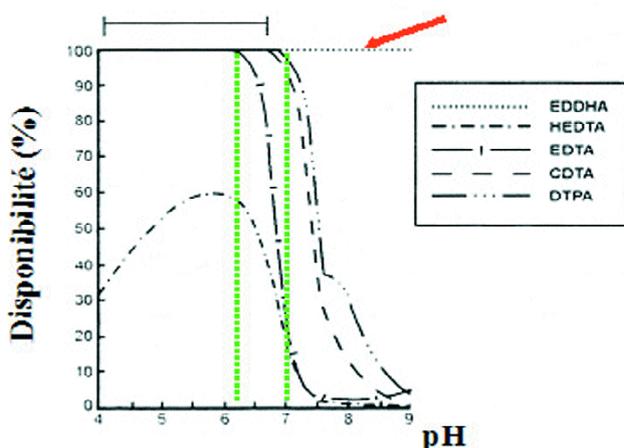
Micronite 15 (Fe 4%; Mn 3%; Zn 4%; Cu 0.5%, Mo 0.05%; B 1.5%; Co 0.1%; Mg 2%)

Cu : $23 \text{ mg} \times 0,5\% = 0,12 \text{ ppm}$ (le même calcul peut se faire pour les autres éléments)

Chélate de fer (6%)

Pour améliorer la disponibilité du fer et contrôler l'apparition des symptômes de fer (photo 4.1), le pépiniériste devra choisir un fertilisant dont la disponibilité du fer reste maximale malgré l'augmentation du pH (figure 5.2). Dans ce cas, on peut choisir le fertilisant à base de fer sous forme EDDHA connu sous le nom commercial « Séquestrène ».

$Fe : 33,5 \text{ mg} \times 0,06 = 2,01 \text{ ppm}$



la disponibilité diminue significativement lorsque le pH dans le substrat varie entre 6 et 7.

Deuxième étape: Calcul des quantités à utiliser

Le calcul des quantités de fertilisants à utiliser devra tenir compte de plusieurs paramètres à savoir:

- La concentration de chaque fertilisant ;
- Le ratio d'injection ;
- Le nombre de plants à fertiliser ;
- Le pourcentage de perte de la solution fertilisante ;
- Le nombre de milligrammes à appliquer pour chaque semis selon les phases de croissance des plants (germination, croissance active, endurcissement, etc.) ;
- Le temps nécessaire pour la fertilisation en tenant compte du débit d'irrigation et des pertes.

Troisième étape : Calcul des quantités nécessaires pour une saison de croissance

Le pépiniériste devra avoir un stock de fertilisants permettant de subvenir aux besoins de toute sa production pendant une saison de croissance (annexe 12). Les fertilisants et les produits phytosanitaires devront être stockés dans un endroit non humide et toujours fermé à clef tout en respectant les précautions spécifiques à chaque produit afin de ne pas avoir des problèmes d'intoxication des ouvriers.

6. Contrôle de la fertilisation

Afin que le pépiniériste s'assure que les quantités des éléments nutritifs sont réellement reçues par les plants lors des différentes fertilisations, il doit faire un contrôle rigoureux de certains paramètres, notamment la conductivité électrique, le pH et les concentrations des éléments nutritifs. Cinq étapes sont nécessaires et suffisantes pour contrôler les concentrations des éléments nutritifs lors de la fertilisation :

- 1- eau d'irrigation;
- 2- solutions stocks des fertilisants c'est à dire après mélange des fertilisants et de l'eau dans une solution très concentrée;
- 3- solution de fertilisation appliquée c'est à dire la solution réellement reçue par les plants lors des fertilisations;
- 4- solution du substrat de croissance;
- 5- solution lessivée à partir des conteneurs.

Conclusion

Avant l'élaboration du programme de fertilisation, la détermination des propriétés physico-chimiques du substrat s'avère nécessaire, ainsi que l'évolution de la qualité de l'eau d'irrigation durant les quatre saisons (automne, hiver, printemps et été). Ceci permettra de déterminer à l'aide des courbes de titration la quantité d'acide phosphorique nécessaire pour diminuer le pH au niveau souhaité (résineux 5,5 ; feuillus 6,5).

Après la germination complète des semences, la fertilité du substrat, plus particulièrement chez les résineux, doit être augmentée afin de diminuer la durée de la phase dépressive des nitrates (immobilisation de l'azote). Durant cette phase, le pépiniériste peut fertiliser deux fois par semaine, surtout chez les résineux, en utilisant, à chaque fertilisation, 6 mg d'azote par plant. Par ailleurs, le pépiniériste doit choisir des fertilisants compatibles afin que les éléments nutritifs ne précipitent pas et qu'ils demeurent disponibles pour les semis (figure 5.2). Le contrôle de l'irrigation est l'élément clef pour une meilleure gestion de la fertilisation (diminution du lessivage, aération, croissance des racines, meilleure absorption des éléments nutritifs, etc.). La déficience en fer est intimement liée à un pH élevé, un excès d'irrigation (substrat toujours saturé) et une concentration élevée en bicarbonates. En plus de l'acidification de l'eau d'irrigation, l'inoculation par des champignons mycorhiziens en deux étapes

(mélange des spores avec le substrat lors du remplissage des conteneurs et pendant l'endurcissement des semis) permet de rendre le fer disponible et de corriger les symptômes de chlorose observés au niveau des jeunes aiguilles. Après chaque fertilisation, le pépiniériste devra rincer les semis avec de l'eau d'irrigation pendant au moins cinq minutes.

En plus des suivis de croissance, les analyses minérales des parties aériennes, des racines et des substrats sont indispensables pour mieux cerner le comportement des plants et en même temps pour faire un bon diagnostic des désordres nutritionnels observés. L'analyse minérale devra se faire en utilisant un échantillonnage représentatif de la production, et ce avant la fertilisation. Ces analyses devront se faire d'une façon intensive pendant les trois premières années de production des plants dans chacune des pépinières modernes.

La fertilisation foliaire devra être appliquée en utilisant des solutions diluées et sous forme de pulvérisation fine (humidité relative élevée). L'utilisation d'un surfactant est conseillée afin de prolonger le contact avec la surface des aiguilles. Pour augmenter l'efficacité de la fertilisation foliaire, il s'avère nécessaire de fertiliser la nuit lorsque les températures journalières sont élevées (faible humidité relative).

Chapitre 6

Mise en pratique de l'inoculation ectomycorhizienne dans les pépinières modernes en Tunisie

Introduction

En Afrique du Nord (Maroc, Algérie et Tunisie), la dégradation des forêts naturelles et des plantations est fortement liée aux activités humaines : défrichements, surpâturages, coupes délictueuses et incendies. Cette dégradation est accompagnée souvent par une diminution voire une disparition de la population microbienne dans les sols. Cette population microbienne joue un rôle déterminant dans les cycles biogéochimiques et confère aux plants une tolérance accrue aux différents stress environnementaux surtout dans les zones arides et semi-arides.

En effet, la majorité des plantes vasculaires forment une association symbiotique racinaire avec plus de 5 000 espèces de champignons mycorhiziens. Dans l'ectomycorhize, une des formes de cette symbiose, les hyphes du champignon forment un manchon étroit autour des racines de la plante et s'insèrent entre les cellules sans toutefois y pénétrer. Les manchons établissent le contact entre les centaines de mètres d'hyphes fins qui sillonnent le sol, et la plante qui bénéficie ainsi d'un système racinaire plus étendu. Ce type de symbiose améliore la tolérance à la sécheresse, la nutrition minérale des plants, la croissance des plants par la production de régulateurs de croissance et les mécanismes de défense contre les agents pathogènes par la libération de substances antifongiques dans la mycorrhizosphère.

L'inoculation ectomycorhizienne est essentielle pour la survie et la croissance des plants après plantation surtout dans les sites hostiles. Grâce aux mycorhizes, les plants forestiers peuvent survivre et croître aussi bien sur les résidus miniers de charbon que sur les latérites minces et pauvres d'Afrique. Pour améliorer davantage la survie des plants en site de reboisement en Afrique du Nord, des techniques de mycorhization des plants en pépinières forestières ont été développées. Ainsi, la mycorhization en pépinière est devenue une pratique relativement bien maîtrisée et à la portée des techniciens forestiers. En effet, l'inoculation par les spores reste la technique la plus facile, la moins coûteuse et qui ne nécessite pas beaucoup de manipulations pour préparer l'inoculum tout en respectant le maintien de la diversité génétique des champignons ectomycorhiziens. Le recours et la mise en pratique de cette technique ont donné d'excellents résultats en pépinière forestière.

Le problème majeur dans les pépinières modernes en Tunisie est le pH neutre à alcalin de l'eau d'irrigation et du substrat de croissance. La présence de bicarbonates à des concentrations élevées dans l'eau d'irrigation contribue à l'augmentation rapide du pH du substrat, plus particulièrement dans la zone racinaire. Cette augmentation affecte négativement la disponibilité de certains éléments minéraux. Ceci se traduit par l'apparition de symptômes de déficience en fer dès la fin de l'été ou au début d'automne selon la qualité de l'eau et le substrat utilisé dans la pépinière. L'inoculation des plants au moment opportun facilite généralement la correction de cette déficience. Or, le compost à base de branches d'Acacia ou d'écorce de pins est un produit stérile car la température lors du compostage peut dépasser 70°C. À cet effet, l'inoculation ectomycorhizienne des plants pourrait être utilisée comme pratique culturale en pépinière forestière en vue de corriger la déficience en fer.

Ainsi, les principaux objectifs de ce chapitre consistent à i) faire un rappel des principales formes d'associations mycorhiziennes et des différentes sources d'inoculum; et ii) évaluer les effets de l'inoculation ectomycorhizienne en relation avec la déficience en fer.

1. Principales formes d'associations mycorhiziennes

Une mycorhize (myco = champignon et rhize = racine) est une association symbiotique entre un champignon et une plante. Généralement, les champignons filamenteux impliqués dans l'association mycorhizienne appartiennent aux basidiomycètes (bolets, lactaires, etc.), aux ascomycètes (truffes, etc.) ou aux zygomycètes caractérisés par des hyphes filamenteux non cloisonnés (*Glomus*, *Gigaspora*, etc.).

Contrairement aux champignons pathogènes, les champignons mycorhiziens ne colonisent que le cortex de la radicelle et n'envahissent pas la stèle contenant les vaisseaux conducteurs. D'après la morphologie des mycorhizes à l'extérieur et à l'intérieur des racines, on distingue trois principaux groupes.

1.1 Les endomycorhizes

Ce groupe de champignons de mycorhiziens forme des associations symbiotiques avec plus de 95% des espèces végétales (plantes cultivées en agriculture et en horticulture, espèces arborées de la forêt tropicale, feuillus des climats tempérés). Après colonisation des racines, ce groupe de champignons pénètre entre les cellules du parenchyme cortical et développe à l'intérieur des cellules de nombreuses invaginations. Les endomycorhizes à vésicules et arbuscules (zygomycètes) sont les plus répandues dont les hyphes sont non cloisonnés «ou septés». Les orchidées et les éricacées (bruyère, azalée, etc.) forment d'autres types d'endomycorhizes. Il s'agit de mycorhizes à pelotons intracellulaires à hyphes cloisonnés. En pénétrant dans les cellules de la radicelle, le champignon endomycorhizien ne perce que la paroi cellulaire et laisse intacte la membrane cytoplasmique; il préserve ainsi l'intégrité des cellules. Les endomycorhizes ne sont détectées avec certitude qu'au microscope avec l'aide des colorants. Les champignons de ce groupe ne peuvent être cultivés qu'en présence d'une plante hôte.

1.2 Les ectomycorhizes

Cette association symbiotique est spécifique aux arbres forestiers des zones tempérées (environ 5% des espèces végétales). Ce type d'association est formé principalement par des basidiomycètes-agaricales (*Boletus edulis*) et gastéromycètes (*Pisolithus tinctorius*, *Rhizopogon* sp.), des ascomycètes (*Tuber* sp.), mais parfois par *Cenococcum geophilum*, champignon imparfait (photo 6.1). Dans cette association, les hyphes restent à l'extérieur des cellules en formant un manchon fongique autour des cellules et pénètre entre les cellules du cortex racinaire (réseau de Hartig).

À l'inverse des champignons endomycorhiziens, les champignons ectomycorhiziens sont cultivables en culture pure. Chez une plante, la présence des ectomycorhizes ainsi que la phase extramatricielle, sont facilement détectables à l'œil nu (photo 6.2). La formation du manchon fongique modifie l'aspect et la coloration des extrémités des racines.

1.3 Les ectendomycorhizes

Ces champignons sont très peu répandus et développent aussi bien un manchon fongique à l'extrémité des racines, que des formations endocellulaires en peloton. On les trouve chez les arbutées (arbousier) et chez certains jeunes plants forestiers résineux en pépinière.

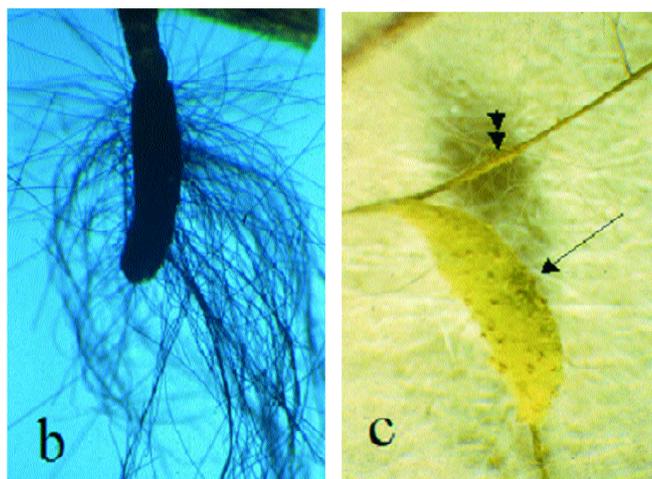
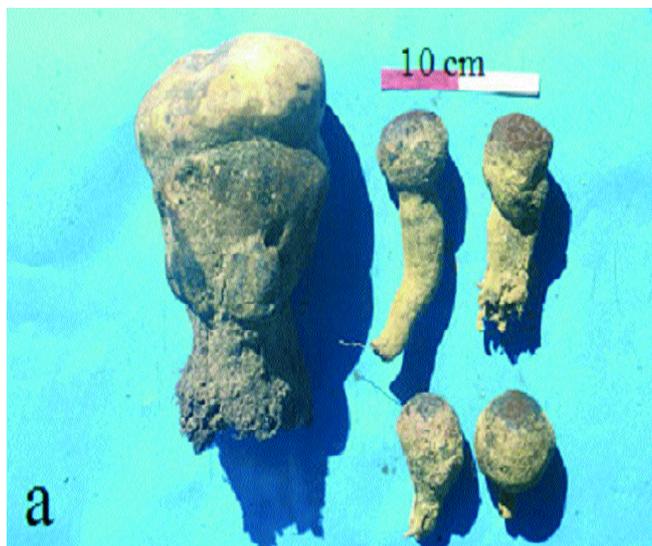


Photo 6.1. Photos montrant un a- exemple de carpophore (fructification) de *Pisolithus tinctorius*. Ces fructifications sont ramassées sous un peuplement constitué de plusieurs espèces d'eucalyptus à Oued El Bir (Tunisie). b- une racine mycorhizée à l'aide de *Cenococcum geophilum*. c- Exemple d'un sclérote (flèche) de *Pisolithus tinctorius*. Il s'agit d'une forme de conservation et elle contient des spores. Elle se forme en réponse à différents stress environnementaux, notamment la sécheresse. La double flèche indique un cordon mycélien (Clichés : Lamhamedi).

notamment la sécheresse. La double flèche indique un cordon mycélien (Clichés : Lamhamedi).

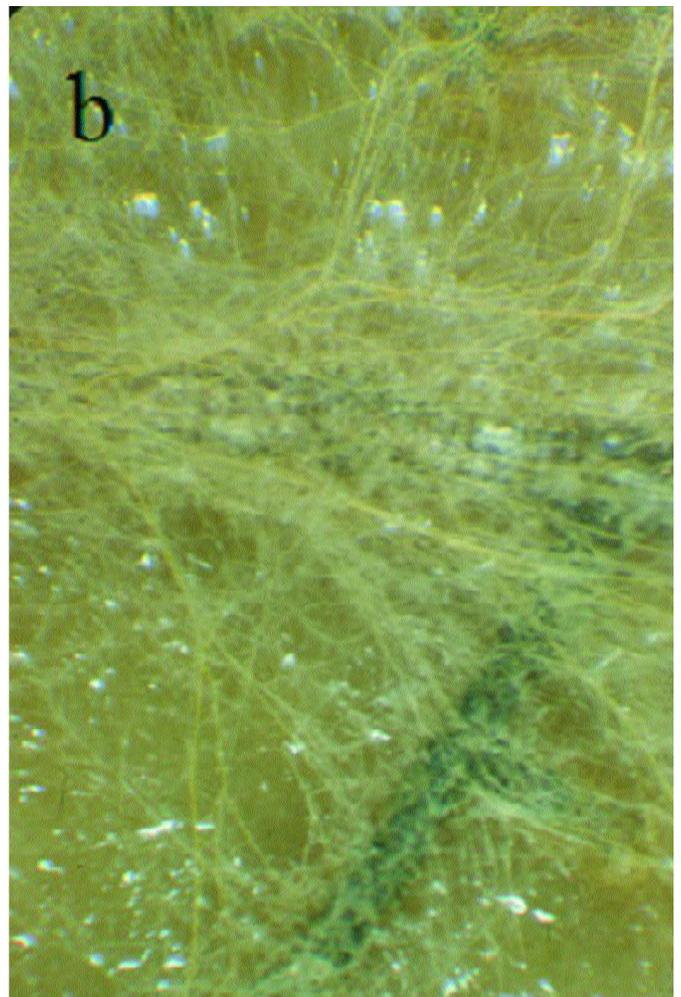


Photo 6.2. Photos montrant a- une phase extramatricielle constituée par des cordons mycéleins (flèche) et mycorhization des racines (ramification dichotomique, double flèche) par *Pisolithus tinctorius*. b- Une phase extramatricielle constituée uniquement par des hyphes fins. En plus de l'effet des variables environnementales de la rhizosphère (substrat, fertilité), ces caractéristiques sont affectées par le génotype du champignon (Clichés : Lamhamedi).

1. 2 Les ectendomycorhizes

La présence de l'association mycorhizienne dans les différents écosystèmes n'est pas un phénomène occasionnel, mais elle devra être considérée comme une règle générale chez les plantes. La présence des mycorhizes confère aux plants plusieurs avantages.

2. Avantages de la mycorhization

La présence de l'association mycorhizienne dans les différents écosystèmes n'est pas un phénomène occasionnel, mais elle devra être considérée comme une règle générale chez les plantes. La présence des mycorhizes confère aux plants plusieurs avantages.

2.1 Meilleure amélioration de la capacité d'absorption

Pour chacune des associations, le champignon mycorhizien développe dans le sol un réseau d'hyphes ou de filaments extrêmement ramifié. Ceci augmente considérablement la surface d'échanges de la racine avec le sol. Cette extension du système racinaire facilitera l'absorption des éléments minéraux peu mobiles (zinc et phosphore) qui deviennent

normalement non disponibles dans la zone d'épuisement au voisinage de chaque racine non mycorhizée.

Parfois, les hyphes des ectomycorhizes se regroupent pour former des cordons mycéliens ou des rhizomorphes spécialisés dans le transport de solutions aqueuses. Ces structures sont visibles à l'œil nu. Dans le cas des champignons endomycorhiziens, la phase extramatricielle est constituée uniquement par des hyphes fins, visibles uniquement à l'aide du microscope.

En plus d'accroître la capacité d'absorption de l'eau et des éléments minéraux, certains champignons mycorhiziens ont une grande capacité à extraire et à solubiliser des formes peu solubles d'éléments minéraux grâce à certains enzymes spécifiques aux microorganismes. Dans ce sens, la surface des hyphes est souvent recouverte de cristaux d'oxalate de calcium qui, au contact des minéraux de sol, se transforment en un acide, l'acide oxalique, qui dissout les minéraux. Ces minéraux deviennent par la suite absorbables par la plante.

La nutrition azotée est aussi facilitée par la mycorhization, en particulier chez les ectomycorhizes. Même pour les légumineuses, déjà avantagés par leur symbiose avec des bactéries fixatrices de l'azote de l'air, l'association mycorhizienne accroît la fixation d'azote, surtout dans les sols pauvres en phosphore.

2.2 Meilleure protection contre les stress biotiques et abiotiques

La présence de champignons mycorhiziens contribue à l'amélioration de la protection des plants contre les différents agents pathogènes (nématodes, champignons, etc.). Chez les ectomycorhizes, cette protection est la résultante de plusieurs mécanismes, notamment :

- la création d'une barrière physique due à la présence du manchon fongique;
- les conditions de croissance défavorables aux agents pathogènes suite aux modifications physico-chimiques au niveau de la rhizosphère;
- la libération des substances antifongiques;
- la stimulation des mécanismes de défense de la plante hôte par la libération des substances phénoliques, et

- la compétitivité des mycorhizes vis-à-vis de la microflore présente dans la zone racinaire.

Outre cette protection contre les agents pathogènes du sol, les mycorhizes accroissent également la résistance aux stress abiotiques. Une plante mycorhizée résiste mieux à la sécheresse, voire même à la pollution par des métaux lourds et tolère des niveaux plus élevés de salinité.

2.3 Production de substances de croissance végétale

Les champignons peuvent produire les principales substances de croissance, notamment les auxines, les gibérellines, les cytokinines et l'éthylène. Ceci laisse présager que le champignon mycorhizien peut influencer plusieurs processus physiologiques de la plante via un contrôle hormonal. En conditions de sécheresse, il s'est avéré que les plants mycorhizés ont des concentrations foliaires élevées en acide abscissique par comparaison aux plants non mycorhizés. Ce régulateur de croissance permet aux plants mycorhizés de fermer leurs stomates en présence d'un stress hydrique. De plus, la présence de champignons mycorhiziens peut expliquer, par exemple, la précocité de la floraison, les changements dans le temps de l'aoûtement et du débourrement des espèces ligneuses, ainsi que les modifications morphologiques du système racinaire.

2.4 Coût énergétique des mycorhizes et leur nécessité pour la plante

Le champignon procure à la plante de l'eau, des éléments minéraux et des hormones de croissance. La plante, à son tour, nourrit le champignon à partir des sucres produits lors de la photosynthèse. On estime que près de 15 à 20 % des sucres de la photosynthèse seraient fournis au champignon mycorhizien. Malgré ce coût énergétique, les mycorhizes sont cruciaux pour la survie et la croissance des plants, ainsi que pour la tolérance aux différents stress biotiques et abiotiques (nématodes, champignons pathogènes, stress hydrique, etc.).

3. Inoculation des plants

L'utilisation d'un substrat standard stérile à base de compost et l'absence d'une mycorhization naturelle fort importante à cause du climat défavorable, ainsi que l'absence de massifs forestiers proches de toutes les pépinières forestières modernes de la Tunisie justifie le recours à l'inoculation par les champignons ectomycorhiziens. Les années sèches sont caractérisées par une production très faible de carpophores de champignons. Parmi les champignons les plus abondants en Afrique du Nord et qui tolèrent le stress hydrique et les hautes températures, on trouve le *Pisolithus tinctorius*, le *Rhizopogon* sp. et le *Cenococcum geophilum*. L'abondance de ce dernier est relativement très faible par comparaison aux deux premiers.

3.1 Principales méthodes d'inoculation

Il existe plusieurs méthodes d'inoculation ectomycorhizienne :

- sol et humus forestier : le terreau forestier ramassé sous des peuplements forestiers contient généralement des spores de champignons mycorhiziens, des racelles mycorhizées et des sclérotés;
- inoculation par des spores : cette technique d'inoculation des plants a été utilisée lors de la première phase de modernisation des plants car elle ne nécessite pas d'installations très sophistiquées en matière de laboratoire. un modeste investissement. Les spores sont obtenues à partir des fructifications dont l'abondance est relativement importante en automne surtout après les premières pluies. L'inoculation par les spores peut se faire en deux phases. La première application doit être effectuée lorsque la germination est complétée alors que la deuxième inoculation d'assurance peut se faire lorsque la croissance en hauteur cible est atteinte. La deuxième inoculation peut se faire dès la fin du mois d'août, c'est-à-dire après les chaleurs d'été et lorsque la croissance des racines est importante. De plus, pendant cette deuxième phase, les apports en fertilisants sont faibles car la fertilisation peut inhiber le développement et l'installation des mycorhizes.

Sur le plan pratique, on doit récolter les fructifications des deux champignons (*Rhizopogon* et *Pisolithus*) tout en évitant de ramasser les carpophores âgés et complètement ouverts. On place ces fructifications dans un sac en papier (pas en plastique) et on les laisse sécher à l'abri des poussières, à la température ambiante (20-25°C). Une fois que les fructifications sont séchées, on les garde au réfrigérateur à 4°C. Elles peuvent ainsi se conserver pendant un à trois ans. On note sur le sac, l'espèce de champignon, la date de récolte, ainsi que le poids.

Au moment de procéder à l'inoculation, on sort les fructifications du réfrigérateur, on les place sur un papier ciré de préférence et l'on s'assure d'en vider le contenu. Les enveloppes de la fructification sont rejetées et la masse de spores obtenue est tamisée pour éliminer les particules qui pourraient obstruer les asperseurs.

L'inoculation peut être effectuée en utilisant le système de fertigation. Les spores ont généralement un diamètre inférieur à 50 µm, ce qui facilite leur passage à travers les filtres et les asperseurs. Une quantité de 40 à 60 ml de spores est suffisante pour inoculer 100000 plants. La quantité de spores nécessaire à l'inoculation peut être mélangée avec deux litres d'eau et stockés dans un réfrigérateur pour assurer une bonne dispersion des spores dans la solution initiale. Lors de l'inoculation des plants, on devra mouiller le feuillage (durée : 2 minutes), procéder à l'inoculation par les spores et rincer les plants (durée : 2 minutes) pour permettre à la majorité des spores d'être en contact direct et de façon rapide avec la rhizosphère. Ainsi, deux à trois semaines après inoculation des plants aussi bien en pépinière traditionnelle qu'en pépinière moderne, on observe normalement la présence de mycorhizes blanches dans le cas de *Rhizopogon* et jaunes pour *Pisolithus* (photo 6.3).

Photo 6.3. Exemple de mycorhization des plants de *Pinus pinaster* à l'aide de a- *Pisolithus tinctorius* et de b- *Rhizopogon* dans les pépinières traditionnelles du Maroc suite à l'inoculation des plants par des spores (Clichés : J. A. Fortin).



Au lieu d'utiliser les spores comme inoculum, certaines pépinières en Orégon aux Etats-Unis utilisent des broyats de carpophores de *Rhizopogon*. Ce broyat est constitué par un mélange des morceaux de carpophores finement coupés en présence de l'eau. Ce type d'inoculum peut être stocké au réfrigérateur pendant trois ans sans que son pouvoir mycorhizogène soit affecté.

Inoculation par des cultures mycéliennes pures : Il s'agit de la technique d'inoculation la plus intéressante et la plus difficile. Cette approche permet au pépiniériste de choisir le champignon ou le mélange de champignons. Elle nécessite un effort en matière d'isolation des souches, de testage et de contrôle des régies de culture. Deux types d'inoculums mycéliens sont actuellement utilisés. L'inoculum

solide produit sur mélange de tourbe, de vermiculite et de milieu nutritif. L'inoculum liquide obtenu sur un milieu nutritif liquide.

3.2 Résultats de l'inoculation des plants en pépinière

L'inoculation des plants de pin d'Alep et de pin pignon à l'aide de spores de *Rhizopogon* a conduit à une intense colonisation des racines et à une correction de la chlorose des plants due à une déficience en fer. Les plants témoins non-inoculés ont toujours montré une chlorose des aiguilles. Lorsque cette déficience n'est pas corrigée, les aiguilles des apex deviennent blanches, non fonctionnelles suivi d'une perte de turgescence et d'un dessèchement (Photo 6.4). Nous avons observé une bonne extension de la phase extramatricielle constituée par des cordons mycéliens.

Les champignons mycorhiziens facilitent l'absorption et la disponibilité du fer dans la rhizosphère à cause de:

- l'augmentation de la surface de contact c'est-à-dire l'augmentation du nombre de points d'entrée;
- la production d'acides organiques et plus particulièrement l'acide oxalique, ce qui acidifie la mycorhizosphère. La concentration de cet acide est augmentée par les nitrates, le calcium et les bicarbonates;
- la production de sidérophores (hydroxamate). Ces sidérophores agissent comme chélateur et comme réservoir du fer. La stabilité de ces sidérophores est plus élevée (10^{30}) par comparaison au fer chélaté qui se vend comme fertilisant.



Photo 6.4. Photos montrant que la mycorhization des plants à l'aide de Rhizopogon dans les pépinières modernes en Tunisie contribue de façon significative à la correction de la déficience en fer (a et c). b- Excellente colonisation de la motte et formation des cordons mycéliens dans un substrat constitué par un mélange à base de compost d'Acacia, de compost des écorces de pins et des granules de liège. d- Fructification (flèche) et mycorhization des plants de chêne liège à l'aide de *Laccaria bicolor*. Ce champignon existe dans les forêts naturelles de chêne liège en Tunisie (Clichés : Lamhamedi).

Conclusion

La mycorhization des plants forestiers d'essences résineuses suite à l'inoculation des plants par des spores est une technologie facile à être appliquée aussi bien dans les pépinières modernes que traditionnelles. La mycorhization des plants doit être considérée comme une pratique culturale qui contribue de façon significative à l'amélioration de la qualité des plants. Les effets positifs de la mycorhization ne peuvent être observés qu'en présence de stress environnementaux ou de conditions très sévères qui limitent la survie, la croissance et la nutrition minérale des plants.

Les résultats des suivis effectués durant la première phase de modernisation des pépinières forestières en Tunisie ont démontré clairement l'effet bénéfique de

l'inoculation des plants en matière de correction des symptômes de déficience en fer. L'utilisation des mycorhizes était combinée à d'autres techniques, notamment l'utilisation de l'acide phosphorique pour diminuer le pH de la rhizosphère et l'utilisation d'un fertilisant (Séquestrène) dont la disponibilité du fer n'est pas affectée par l'augmentation du pH.

Pour améliorer davantage les techniques d'inoculation et obtenir une mycorhization relativement homogène des plants, les pépiniéristes devront recevoir une formation spécifique quant aux pratiques et aux régies de culture (fertilisation, irrigation, pesticides, etc.) qui peuvent affecter négativement la colonisation des plants par les mycorhizes.

Chapitre 7

Qualité des plants forestiers et performance en site de reboisement

Introduction

Le taux de survie et la croissance des plants en site de reboisement sont fortement influencés par la qualité des plants produits en pépinière, ainsi que par la qualité du site (travail du sol, fertilité et réserves hydriques) et par les variables environnementales (précipitations, température, humidité relative et déficit de pression de vapeur) après plantation. En site de reboisement, le plant est soumis à l'interaction simultanée de divers stress biotiques et abiotiques.

La qualité des plants en pépinière forestière est affectée par diverses pratiques culturales et divers facteurs, notamment la qualité et le bagage génétique des semences, l'irrigation, la fertilisation en relation avec les concentrations foliaires et la présence ou l'absence de maladies.

La production de plants de qualité nécessite une optimisation des différentes phases de la filière de production de plants c'est-à-dire de la semence à la plantation (figure 7.1). L'utilisation des plants de qualité permettra de diminuer de façon significative les coûts engendrés par les regarnis répétés. Ainsi, l'utilisation et le calibrage de variables de qualité de plants en tenant compte du comportement des plants en site de reboisement contribueront à l'élaboration de critères d'évaluation de la qualité des plants spécifiques à chaque essence. Dans le cas d'une privatisation de certaines pépinières forestières, ces critères de qualification des plants sont indispensables pour payer les pépiniéristes selon la qualité des lots de plants produits.

Les objectifs de ce chapitre sont : i) de faire un rappel des principaux objectifs de l'évaluation de la qualité des plants; ii) d'énumérer les principaux critères morphologiques et physiologiques, ainsi que les principales normes de qualification des plants utilisées à l'échelle opérationnelle; et iii) de suggérer les principales améliorations à apporter à la filière de production de plants en pépinières forestières modernes en Tunisie.

1. Principaux objectifs de l'évaluation de la qualité des plants forestiers

Un plant peut être considéré de qualité lorsqu'il répond aux objectifs assignés au programme de reboisement (protection, production forestière ou agro-forestière et récréation). Les principaux objectifs de l'évaluation de la qualité des plants forestiers consistent à :

- déterminer les effets des pratiques culturales en pépinière sur la croissance, la physiologie et la survie après plantation;
- éliminer à l'avance les plants qui ne vont probablement pas performer en plantation;
- déterminer les principaux facteurs qui peuvent affecter la qualité des plants durant la filière de reboisement en vue de corriger les pratiques qui affectent cette qualité;
- prédire la survie et la croissance des plants en se basant sur les variables morphologiques et physiologiques;
- assigner les caractéristiques des plants aux spécificités des sites;
- comprendre les échecs de reboisement.

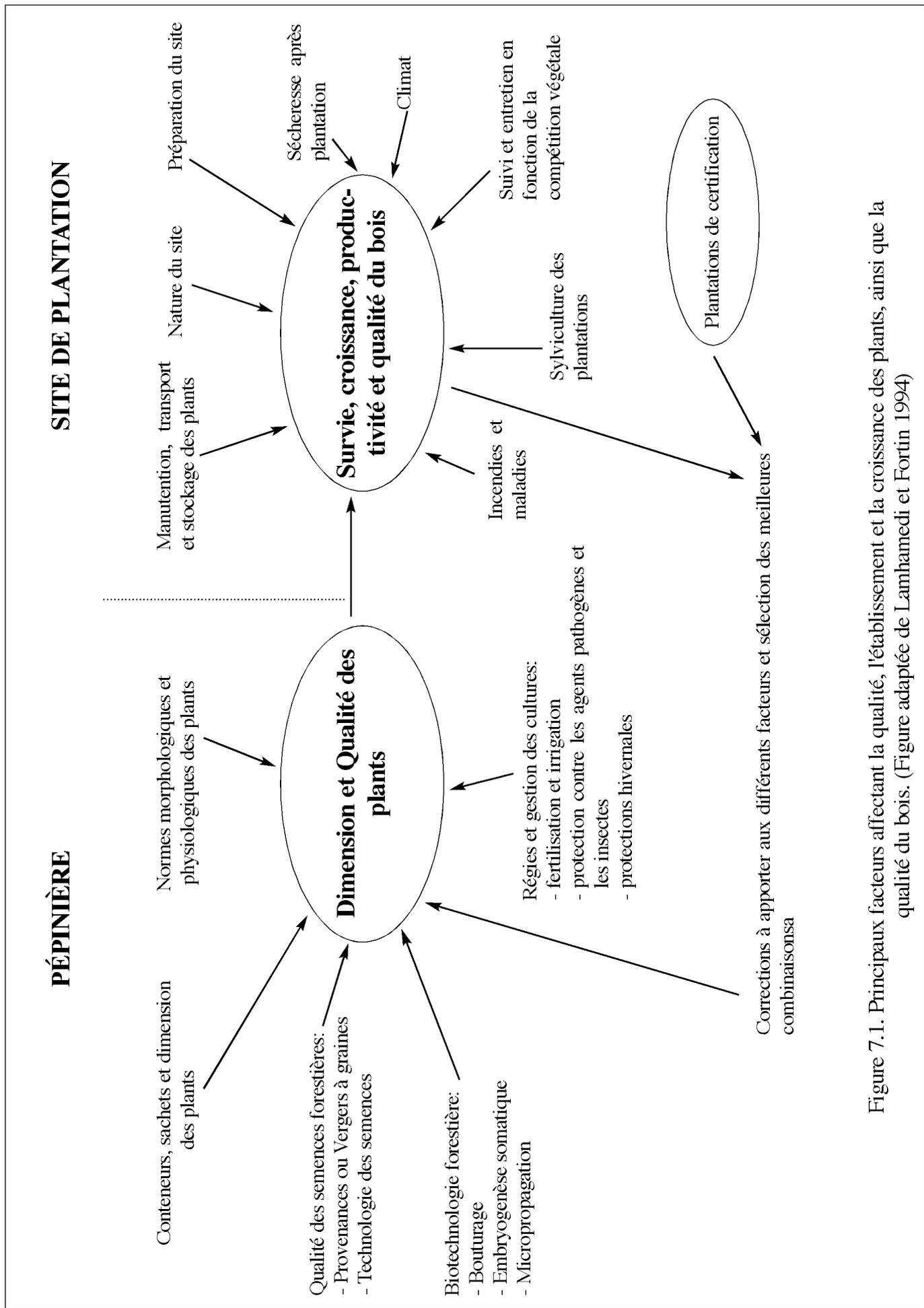


Figure 7.1. Principaux facteurs affectant la qualité, l'établissement, l'établissement et la croissance des plants, ainsi que la qualité du bois. (Figure adaptée de Lamhamedi et Fortin 1994)

2. Variables morphologiques et physiologiques de qualification des plants

Vers la fin de la campagne de production et juste avant la livraison des plants, le pépiniériste effectue certains inventaires de base par essence et par secteur de la pépinière. Tout d'abord un inventaire quantitatif qui permet de déterminer le taux d'occupation réel des cavités des conteneurs par les plants. Par la suite, le pépiniériste évalue la qualité des plants en respectant les normes de qualification des plants qui sont exigées généralement par l'acheteur des plants. Les normes et les critères de qualification des plants peuvent être déterminés par la Direction Générale des Forêts (Tunisie) tout en tenant compte des spécificités de chaque essence, des conditions de production (nature du substrat, pépinière moderne ou traditionnelle) et des possibilités de son utilisation (production forestière ou agro-forestière, récréation, brise-vent, protection, etc.), ainsi que les caractéristiques du site de plantation (zones humides ou semi-arides, absence ou abondance de la compétition végétale).

Ces normes de qualité sont relatives non seulement aux critères morphologiques, mais aussi à certains critères physiologiques. Tous ces critères sont fortement influencés par les pratiques culturales en pépinière qui sont généralement réajustées en fonction du concept des caractéristiques cibles du plant. Lors de la première phase de modernisation des pépinières forestières, en plus des suivis de croissance de base pour chaque essence, nous avons évalué plusieurs variables de croissance et physiologiques des principales essences produites.

2.1 Variables morphologiques

Parmi, les variables morphologiques les plus utilisées lors de la qualification des plants, mentionnons :

a- Hauteur et diamètre

La hauteur et le diamètre sont considérés parmi les

variables qui peuvent prédire au mieux la performance des plants après plantation. Le diamètre au collet est généralement corrélé à plusieurs variables

morphologiques (hauteur, poids sec total, poids sec des racines et poids sec de la partie aérienne) car il s'agit d'une variable qui intègre la réponse morphologique aux facteurs environnementaux. Certains travaux ont montré que le diamètre au collet peut expliquer plus de 97% de la variation observée concernant la masse totale du plant. Les plants ayant un gros diamètre possèdent généralement des racines latérales bien développées tout en conférant aux plants un meilleur taux de survie.

La hauteur constitue un bon indicateur de la capacité photosynthétique et de la surface de transpiration qui sont étroitement corrélées avec la surface foliaire. Cependant, la hauteur n'a pas révélé une corrélation systématique avec la survie mais une bonne relation avec la croissance en hauteur. Les normes de hauteur peuvent varier en fonction de l'espèce, l'âge, la période de sortie des plants de la pépinière et les caractéristiques du site en tenant compte surtout de l'importance de la compétition végétale (photo 7.1). Généralement, il est préférable de planter des plants de hauteur limitée en zones semi-arides et des plants de fortes dimensions (hauteur importante : 25-40 cm) dans les sites humides où la compétition végétale est importante, ainsi que dans le cadre d'installation de brise-vent.

b- Ratio des masses (partie aérienne/racines = PA/R) et qualité des racines

Le ratio (PA/R) est considéré comme un indice d'équilibre entre la surface de transpiration (feuillage) et la surface d'absorption d'un plant (racines). Un ratio faible signifie que les racines sont abondantes par rapport à la biomasse foliaire et que ce genre peut tolérer et survivre en conditions de sécheresse après plantation. Par contre, un ratio élevé signifie que les racines ne sont pas abondantes et que ce type de plant va être plus susceptible au stress hydrique plus particulièrement en zones semi-arides ou dans les sites où la demande évaporative est élevée.



Photo 7.1. Exemple de divers plants forestiers produits dans des substrats à base de compost a- Chêne liège (*Quercus suber*), b- Cyprés (*Cupressus sempervirens*) produit pendant une seule saison de croissance et non en deux saisons, c- Pin d'Alep (*Pinus halepensis*)
d- Pin brutia (*Pinus brutia*). Noter le développement des racines à l'intérieur et à la périphérie de la carotte.
e- *Casuarina* et f- *Acacia cyanophylla*. Notez la qualité du système racinaire, la présence de racines blanches et la cohésion de la motte (Clichés : Lamhamedi & Fecteau).

Dans la production des plants en conteneurs, un ratio (T/R) de 1.5 à 2 g/g est considéré comme indice satisfaisant. D'autres travaux ont constaté que l'utilisation de ce ratio (T/R) reste limitée dans l'évaluation de la qualité des plants produits en conteneurs quant à la prédiction de la croissance et de la survie en site de reboisement. Durant la phase de production des plants en conteneurs, les conditions de croissance favorables (fertilisation, substrat léger, eau, teneur en eau et température au niveau de la rhizosphère) permettent une excellente prolifération et une bonne cohésion des racines (photo 7.1). Après plantation, l'évitement de la sécheresse est fonction de l'extension des racines de la carotte et l'exploration du volume de sol. En effet, la distribution extensive des racines après plantation est plus importante que la masse des racines. L'évolution de ce ratio est fortement influencée par l'allocation du carbone entre la partie aérienne et les racines, et ce en fonction du climat du site. Généralement, ce ratio est plus élevé en zones humides par comparaison à celui des plants croissant en zones semi-arides.

En plus du ratio (PA/R), l'architecture des racines peut être utilisée comme critère de prédiction de la survie des plants en site de reboisement. La formation précoce de racines secondaires assure la cohésion de la carotte. Le développement de racines latérales en conteneurs confère une exploitation rapide du sol et un approvisionnement en eau et en éléments nutritifs tout en permettant au plant de surmonter le choc de transplantation. Ce type de racines augmente le nombre de contacts sol-racine, améliore la conductivité hydraulique de l'eau et son utilisation durant la phase d'établissement en site de reboisement.

2.2 Variables physiologiques

Plusieurs variables physiologiques sont utilisées pour évaluer la qualité des plants: relations hydriques, statut nutritionnel, capacité de croissance racinaire, mycorhization, échanges gazeux, fluorescence et variables biochimiques (sucres, amidon et émission des substances volatiles). Parmi les variables les plus utilisées lors de la première phase de modernisation, on peut citer la mycorhization des plants, la capacité de croissance des racines et le statut nutritionnel des plants.

a- Mycorhization des plants

La colonisation, par des champignons mycorhisiateurs, des racines des essences résineuses (pin d'Alep, pin pignon et pin brutia) les plus utilisées dans les programmes de reboisement en Tunisie s'avère indispensable pour corriger la déficience en fer et améliorer la survie et la croissance après plantation (se référer au chapitre 6). L'inoculation des plants par *Rhizopogon* et *Pisolithus* confère aux plants une résistance à la sécheresse.

b- Statut nutritionnel

Le statut nutritionnel est l'un des facteurs physiologiques qui peut influencer de façon significative la survie et la croissance des plants après plantation. Des concentrations d'azote de 1,6 à 2 % peuvent assurer un taux de survie de 90 % chez les résineux. Lors de la phase d'établissement des plants c'est-à-dire après plantation, l'initiation de nouvelles racines, le débournement et la croissance des aiguilles sont influencés par les réserves initiales en éléments minéraux. En effet, les plants ayant un bon statut nutritionnel ont généralement des taux de photosynthèse satisfaisants, une augmentation de la surface foliaire et une bonne efficacité de l'utilisation de l'eau.

Par ailleurs, une surfertilisation en azote ou des concentrations élevées (2,7 à 3,4%) affecte négativement la croissance et la survie des plants. Ces concentrations élevées augmentent la sensibilité des plants aux stress environnementaux. Lors de la production des plants en conteneurs, un programme de fertilisation bien conçu devrait être adopté pour atteindre les normes de production (paramètres morphologiques et physiologiques) cibles préalablement déterminées en fonction de l'essence et de la zone de plantation. Ceci permettra de tenir compte des stress environnementaux qui peuvent affecter la survie et la croissance des plants en site de reboisement. Pour pallier aux effets d'une surfertilisation, les programmes de fertilisation doivent être ajustés en fonction des stades de croissance (germination, croissance exponentielle et durcissement) et de l'essence à produire.

c- Capacité de croissance des racines

La capacité de croissance des racines (CCR) est la capacité d'un plant à initier de nouvelles racines en conditions favorables pendant une période déterminée (photo 7.2). La CCR est parmi les tests les plus utilisés et probablement le plus important dans l'évaluation de la qualité des plants surtout lorsqu'on veut calibrer les substrats de croissance et les régies de culture (irrigation et fertilisation) appliquées en pépinière. Les plants ayant une CCR élevée signifie que leur établissement en site de reboisement sera beaucoup plus rapide. La CCR peut être considérée comme une mesure simple de la santé et de la vigueur du lot des plants. L'initiation de nouvelles racines est corrélée avec la survie et la croissance des plants en site de reboisement. Elle améliore l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs de différentes façons, notamment:

- les nouvelles racines ne sont pas lignifiées et ne possèdent pas de résistance au transport de l'eau;
- le contact à l'interface sol-racine est grandement amélioré;
- l'extension des racines augmente le volume du sol exploité et la conductivité hydraulique des racines. Cette conductivité est proportionnelle au nombre de nouveaux apex des racines formés.

Photo 7.2. a- Plants mis en pot pour évaluer la capacité de croissance racinaire (initiation de nouvelles racines pendant une période de 21 jours). b- Excellente initiation de nouvelles racines blanches des plants de pin pignon produits dans la pépinière moderne (concentration en azote : 1,7 à 2 %). c- Faible capacité de croissance des racines des plants produits en sachets de croissance dans les pépinières traditionnelles. d- Initiation de nouvelles racines à partir des apex racinaires de la motte qui sont cernés par l'air lorsque le plant était produit en conteneur. e- Comparaison entre la capacité de croissance racinaire des plants de Cyprès produits dans la pépinière moderne (à gauche) avec celle des plants produits en sachets (à droite) (Clichés : Lamhamedi).



Différents facteurs influencent l'expression finale de la CCR comme les caractéristiques des plants (génétique et qualité des semences) et leur état physiologique (dormance, réserves en sucres, surface foliaire, statut hydrique et statut nutritionnel). La température du sol a un effet considérable sur la régénération et l'extension de nouvelles racines. La température optimale de croissance des racines est autour de 20°C. Le stress hydrique limite fortement la croissance des racines surtout lorsqu'il survient après plantation. D'autres facteurs peuvent limiter aussi l'initiation de nouvelles racines comme la compaction du sol, la préparation du terrain à reboiser et la surface du feuillage.

3. Principales normes de qualification des plants utilisées à l'échelle opérationnelle

Les normes de qualité des plants destinés au reboisement varient d'un pays à un autre et ce, selon les objectifs de son programme de reboisement. Les pépiniéristes sont payés selon la qualité des lots produits. Ces normes de qualité de plants doivent être ajustées selon les essences, les spécificités des sites de reboisement et les utilisations potentielles de chaque essence (brise-vent, agro-foresterie, production ligneuse, etc.). Ces normes doivent tenir aussi compte des contraintes de production des pépinières forestières en Tunisie. Parmi les critères de qualification les plus utilisés, on peut citer :

- la hauteur et le diamètre au collet;
- le rapport hauteur / diamètre;
- les défauts racinaires;
- la présence de maladies et d'insectes;
- l'apparition de symptômes dus à une déficience minérale;
- le dessèchement du plant ou de l'apex;
- la tige brisée;
- têtes multiples (4 têtes et plus : le plant ne doit pas avoir de fourches sans dominance claire d'une pousse, i.e. au moins une des tiges doit dominer l'autre d'au moins 2,5 cm);
- inclinaison ou sinuosité de la tige;
- pour les essences qui forment des bourgeons terminaux, ils doivent être visibles et viables;
- plus d'un plant par cavité;

- la longueur minimale de la carotte dont la cohésion est assurée par le système racinaire après extirpation. Les plants doivent avoir une quantité suffisante de racines afin de bien extraire la carotte et être en équilibre avec la partie aérienne;
- les masses sèches minimales du plant ou de ses parties aériennes et racinaires;
- la concentration foliaire en azote.

Les définitions exactes de chaque critère doivent être déterminées par un comité tunisien. Le calibrage et l'ajustement de ces critères, en privilégiant le caractère quantitatif mais non subjectif, pourront se faire de façon continue en tenant compte des résultats observés en site de reboisement et des difficultés rencontrées lors de la mise en application de ces normes.

Cependant, la qualité des plants forestiers devrait être maintenue durant les différentes phases de la filière de reboisement (pépinière, transport, stockage et site de plantation) (figure 7.1). Pour améliorer l'installation, la survie et la croissance des plants en site de reboisement, le gouvernement tunisien a entrepris des travaux de grande envergure concernant la préparation mécanisée des sites à reboiser, soit un sous-solage à une profondeur de 80 cm pour des sites situés dans des étages bioclimatiques sub-humide et humide (photo 7.3). Cette préparation améliore la densité du sol, élimine les effets négatifs de la compétition végétale pendant les premières années et favorise la croissance rapide du système racinaire.

Dans le cadre de suivis de dispositifs expérimentaux installés lors de la première phase de modernisation des pépinières forestières en Tunisie, nos observations ont révélé que la croissance des plants produits dans les pépinières modernes est meilleure dans les sites préparés mécaniquement par comparaison aux sites où les plants sont plantés dans des pots. De plus, les plants produits dans les pépinières modernes en conteneurs ont une meilleure croissance par comparaison à ceux produits dans les pépinières traditionnelles en sachets de croissance surtout pendant les premières années après plantation (photos 7.3 et 7.4).

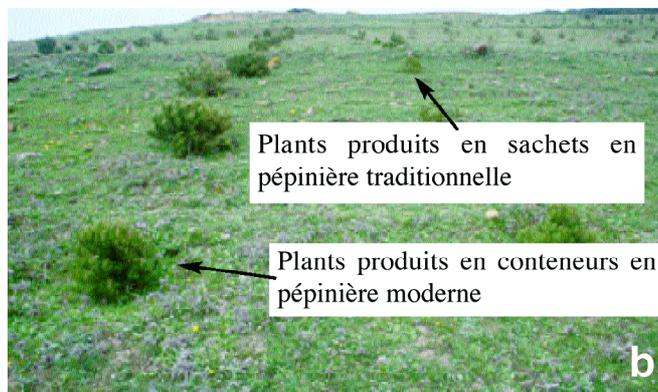


Photo 7.3 a- Exemple d'une préparation mécanisé d'un site de reboisement dans les étages bioclimatiques humides. b et c - Meilleure performance des plants de qualité supérieure produits en conteneurs par comparaison à celle des plants produits en sachets. Ces résultats sont observés dans divers sites de reboisement. (Clichés : Lamhamedi & Fecteau).

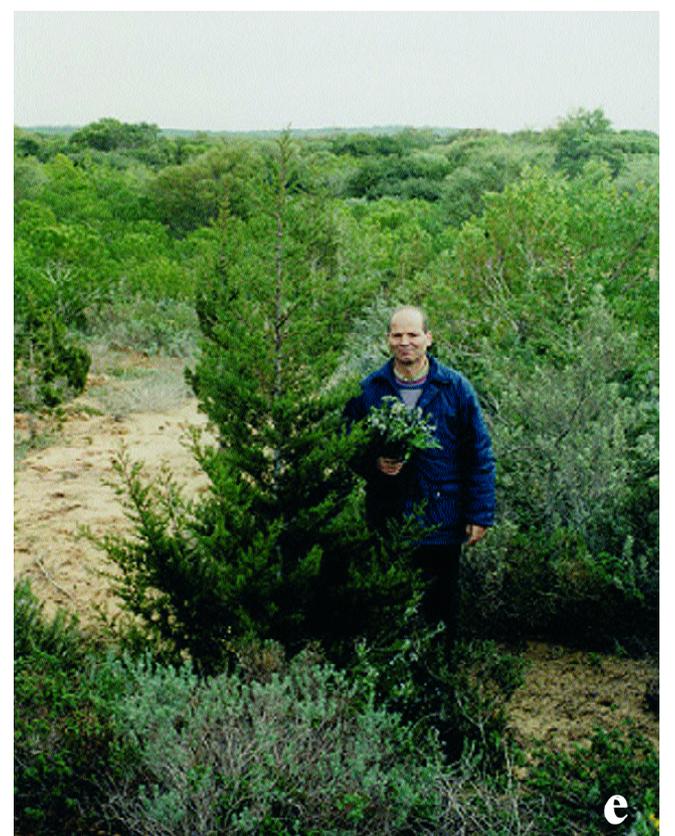


Photo 7.4. Élagage et performance des plants (*Pinus pinea*) produits dans les pépinières modernes. Performance des plants de *Cypressus sempervirens* (date de plantation : Mars 1997) (Clichés : Lamhamedi).

4. Principales améliorations à apporter à la filière de production de plants

La production de plants de qualité impose de nombreuses précautions à prendre lors de la production, la livraison et la mise en terre des plants. Ainsi, des améliorations doivent être toujours apportées en vue de rehausser davantage la qualité des plants. Une attention particulière devrait être accordée à :

- la qualité des semences;
- la qualité du substrat et de l'eau d'irrigation (pH, capacité d'échange cationique, salinité, etc.);
- la phase de germination des semences (contrôle de l'irrigation et des champignons);
- l'opération d'éclaircie-repiquage. Celle-ci devra être débutée dès la fin de la germination et avant le développement des racines secondaires. Le repiquage d'un plant dont le système racinaire (racine pivotante et racines secondaires) est développé contribue à l'augmentation de la fréquence des racines déformées;
- l'optimisation de l'irrigation et de la fertilisation en tenant compte des besoins spécifiques de chaque essence selon les phases de croissance (germination, croissance active et endurcissement);
- la lutte contre les mauvaises herbes;
- la fertilisation et la saturation du substrat juste avant la livraison des plants en site de reboisement;
- l'enlèvement de l'ombrière lors de l'endurcissement des plants, si non les plants pourront montrer des symptômes de phototropisme;
- le stockage des plants dans un endroit ombragé et le recours à des arrosages d'appoint, surtout juste avant la plantation;
- la préparation du sol (travail mécanisé du sol);
- la mise en défens très stricte après plantation;
- la planification dans l'espace et dans le temps des travaux d'entretien et des traitements sylvicoles (élagage, éclaircie, etc.) (photo 7.4).

Conclusion

Le but recherché de tout programme de reboisement est de produire des plants de qualité performants en site de reboisement. Un plant peut être considéré de qualité lorsqu'il répond aux objectifs assignés au programme de reboisement, c'est-à-dire un plant capable de survivre et de croître après plantation. Cependant, la performance des plants est fortement affectée par les conditions et les ressources environnementales (fertilité, teneur en eau du substrat, compétition végétale, température, déficit de pression de vapeur, etc.) spécifiques à chaque site. Différentes variables morphologiques et physiologiques peuvent être utilisées pour prédire la survie et la croissance des plants en site de reboisement. Ces variables devraient être contrôlées durant toute la filière de reboisement (pépinières, transport, stockage en site de reboisement, plantation, etc.) pour maintenir cette qualité.

Les différentes variables morphologiques et physiologiques sont fortement influencées par les pratiques culturales en pépinière. Ces pratiques sont réajustées généralement en fonction du concept du plant cible et des normes de qualité à respecter lors de la livraison des plants.

Des suivis de croissance et de comportement des plants effectués dans le cadre de dispositifs expérimentaux ont révélé que les plants de qualité produits dans les pépinières modernes ont une meilleure performance que les plants produits dans les pépinières traditionnelles.

Chapitre 8

Stratégies de développement, de modernisation et de privatisation des pépinières forestières en Tunisie

Introduction

Depuis près de 10 ans, la Direction Générale des Forêts (DGF) de Tunisie, pilote un programme de modernisation des pépinières forestières de l'État. L'État est le propriétaire des terres forestières du pays. Il est le gestionnaire et le gardien du patrimoine forestier. Dans ce contexte, il va de soi que l'État est impliqué dans les aspects décisionnels des interventions en milieu forestier. Il doit toujours être en mesure de réaliser les objectifs qu'il se fixe par le gouvernement et de remplir ses mandats et obligations en matière de gestion des ressources forestières. Cependant, ceci n'implique pas nécessairement de prendre une part active dans toutes les activités reliées aux différents programmes, notamment celles spécifiques à la filière de production de plants c'est-à-dire de la production de semences à la plantation. de production ou de fabrication.

1. Historique

Généralement, les États qui oeuvrent de façon active dans les divers programmes de reforestation (production, lutte contre l'érosion éolienne et hydrique, reboisement de récréation, environnement urbain, etc.) investissent des montants d'argent importants dans les différents champs d'activité, notamment en production de plants forestiers. Ces produits ne sont généralement pas disponibles en vente libre. Souvent, au moment de l'instauration d'un programme national de reboisement, il y a peu ou pas d'expertise dans ce domaine. La demande est principalement contrôlée par les besoins de l'État surtout dans les pays où la majorité des terres à vocation forestière est de propriété publique. À cet effet, la demande de plants forestiers dépend principalement de l'ampleur des programmes nationaux et des budgets alloués à ce secteur. En Tunisie, au fil des ans, les structures existantes de production de plants se sont renforcées pour devenir des réseaux nationaux de pépinières assumant l'ensemble des activités allant de la récolte des semences jusqu'à la mise en terre des plants forestiers.

La Tunisie représente un exemple type de ce genre de développement, car traditionnellement la DGF s'est occupée des programmes de reboisement, de la sélection des sites à reboiser, de la planification des

travaux de préparation de sol, de la réalisation des travaux de reboisement et de la fourniture de l'ensemble des plants forestiers et des semences. Elle a établi au fil des ans un réseau de pépinières réparties sur l'ensemble du territoire tunisien.

Au cours des dix dernières années, 16 des 100 pépinières ont bénéficié du programme de modernisation. Elles ont été équipées de système d'ombrière, de conteneurs de production et des équipements nécessaires à la fabrication d'un substrat de croissance à base de compost. Durant cette même période, l'Administration forestière a fait appel aux entreprises du secteur privé pour la réalisation des travaux de préparation de terrain et de reboisement par l'octroi de contrats.

2. La problématique

L'État doit définir une stratégie pour la poursuite d'un programme de modernisation des pépinières. Comme par le passé, l'État peut utiliser les moyens financiers et les mécanismes de financements internationaux, ainsi que ses fonds propres, pour développer davantage le secteur forestier, notamment celui des pépinières forestières, pastorales et d'ornement. Présentement, le coût des plants forestiers pour l'État est composé des frais annuels d'opération et d'entretien des pépinières, de l'amortissement des infrastructures et des équipements, du coût du prêt et des coûts de gestion par les organismes gouvernementaux. Pour établir le coût réel des plants produits, il faut tenir compte du total des dépenses encourues et du nombre réel de plants expédiés au reboisement.

Une option pour continuer le programme de modernisation des pépinières amorcé en 1995 est de confier, sous différentes formes, la production de plants forestiers au secteur privé. Déjà les activités de préparation de terrain et de reboisement sont confiées à des entrepreneurs privés par le biais d'appels d'offres et de contrats. Ce type de transfert est déjà courant dans différents secteurs de l'administration tunisienne et cette pratique peut apporter plusieurs avantages à l'administration en matière d'optimisation de la gestion du programme de modernisation des pépinières

forestières et de la production de plants forestiers et pastoraux.

La privatisation n'implique pas une désresponsabilisation ou un désengagement de l'État du secteur forestier, mais un recentrage de ses activités. L'accent sera mis sur le contrôle de la qualité des semences, des plants livrés au reboisement, du support technique aux intervenants, du suivi ainsi que sur la gestion des contrats de production.

3. Privatisation progressive des pépinières forestières et contrôle gouvernemental de la qualité des plants : Une approche de gestion réussie de la filière de reboisement au Canada

Le recentrage des activités de l'État par la mise à contribution du secteur privé pour la production de plants forestiers a déjà été réalisé dans différents pays développés et en développement, et ce sous différentes formes. Il est intéressant d'analyser certaines expériences afin d'apporter quelques éléments de réflexion sur les solutions à préconiser pour la poursuite du programme de modernisation des pépinières. Dans cette partie, nous allons aborder deux exemples concrets de cohabitation harmonieuse entre les secteurs privé et public en matière de production de plants, et ce dans deux provinces canadiennes.

3.1 Province de la Colombie Britannique au Canada

Cette province canadienne produit et reboise près de 200 millions de plants par année pour remplacer les arbres récoltés par l'industrie forestière ou ravagés par les insectes et les maladies, ainsi que par les incendies. Jusqu'au début des années 1980, toute la production de plants forestiers était réalisée dans 10 pépinières publiques. Par la suite, de nouvelles politiques gouvernementales ont permis aux industriels forestiers de contracter directement l'achat de leurs plants chez les pépiniéristes du secteur privé.

Ces industriels spécialisés dans la récolte de bois

exploitent les forêts sur les terres publiques tout en respectant certaines exigences contractuelles. Parmi celles-ci, l'obligation et la responsabilité de remettre en production les terres forestières exploitées. Dans ce cadre, les industriels ont toute la liberté de choisir leurs fournisseurs de plants forestiers.

En 1988, sept pépinières publiques ont été privatisées. Le gouvernement a conservé deux pépinières publiques en opération à des fins de recherche, d'éducation et de témoins de ce secteur d'activité. Depuis ce changement, plus de 40 pépinières privées ont vu le jour dans cette province et en 2004, la dernière pépinière publique a été privatisée.

La majorité des plants reboisés dans la province sont achetés directement par les industries forestières auprès des pépinières privées. Le gouvernement procède à chaque année à l'achat, par appel d'offres, de plants forestiers dans le cas des reboisements qui ne sont pas pris en charge par les industriels, mais qui demeurent sous sa responsabilité. Ces appels d'offres sont accessibles aux pépinières inscrites au fichier de fournisseurs de la province.

Les pépinières qui ont, par le passé, livré des plants en quantité et en qualité selon les normes contractuelles bénéficient d'un système de bonification de leur prix. De plus, elles sont favorisées par rapport aux pépinières moins performantes lors de l'octroi des contrats spécifiques aux programmes futurs de production de plants. Il est important pour le gouvernement, lorsqu'il confie la production d'un certain nombre de plants, d'obtenir les plants en qualité et en quantité pour les activités de reboisement planifiées. Les semences fournies par le gouvernement représentent pour lui un coût qui s'additionne au coût total des plants.

3.2 Province de Québec au Canada

Durant les dix dernières années, le Québec reboise annuellement, en moyenne, près de 150 millions de plants. Jusqu'au début des années 1980, la totalité des plants forestiers reboisés étaient produits dans les neuf pépinières gouvernementales du Québec. Les plants étaient produits presque exclusivement en plein sol et livrés à racines nues.

La volonté gouvernementale d'augmenter l'objectif de reboisement et d'introduire de nouvelles techniques de production (plants en conteneurs) a conduit à l'implication de pépinières privées dans la fourniture de plants forestiers. Seulement quelques pépinières privées existaient à l'époque, la plupart produisant déjà en conteneurs.

Le gouvernement a procédé à l'émission de contrat d'une durée de cinq ans (cinq productions) avec une possibilité de renouvellement. Le gouvernement fournissait les semences et les conteneurs. Le pépiniériste devait posséder les infrastructures et les équipements de production, l'expertise et le personnel qualifié.

Présentement, il existe 18 pépinières privées et 6 pépinières publiques. Les pépinières privées se sont regroupées au début des années 2000 sous l'égide d'un office de mise en marché (Office des producteurs de plants forestiers du Québec). Ainsi, l'ensemble de la production de plants par le secteur privé est négocié à chaque année et réparti entre les pépinières membres. Cette négociation annuelle permet de réajuster les prix et les normes de qualité des différents types de plants produits qui changent selon les besoins du reboisement. Le contrôle de la qualité des plants est assuré entièrement par le gouvernement qui ne paie que les plants qui respectent les normes et les critères de qualité stipulés dans le contrat de production.

4. Scénarios de privatisation en Tunisie

Plusieurs scénarios d'intervention existent et doivent être adaptés selon les objectifs de l'Administration forestière tunisienne, des lois en vigueur, des pratiques existantes et des infrastructures en place. Nous avons identifié cinq scénarios de privatisation qui pourraient être adaptés au modèle tunisien en matière de production de plants forestiers, pastoraux et ornementaux.

4.1 Achat de plants seulement

Avec cette option, toutes les fournitures, infrastructures, équipements de production et semences sont assumées par le producteur privé et sont sous sa responsabilité. L'État spécifie les caractéristiques des produits qu'elle désire obtenir et la période de disponibilité. Le

producteur décide des dates d'ensemencement, des semences à utiliser, du nombre de plants à semer pour atteindre l'objectif de livraison et des techniques culturales à utiliser. Le producteur est le seul responsable de l'atteinte des objectifs contractuels. Lors de la rédaction du cahier de charges, l'État doit s'assurer que les exigences dans le temps et que le prix de vente et les modalités de paiement sont réalistes. Un objectif difficile à atteindre aurait pour conséquence l'augmentation des prix de vente, ce qui pourrait compromettre l'obtention des quantités de plants planifiés au départ de la campagne de production. Ce point est important si ces plants ont été planifiés pour la réalisation de travaux de reboisement par un autre entrepreneur. L'État doit aussi s'assurer de la qualité génétique des semences ainsi que de leur compatibilité avec la zone de reboisement.

4.2 Achat de plants et fourniture des semences

La principale différence avec l'option décrite ci-haut réside dans la fourniture des semences par l'État. Celui-ci doit s'assurer que les semences fournies soient de qualité et que les quantités soient suffisantes pour réaliser les ensemencements. Le contrôle du taux de germination, de la vigueur germinative et de la pureté est essentiel pour assurer au producteur une germination adéquate. Celui-ci investira beaucoup pour la fabrication du compost. Si la germination est inférieure au taux annoncé et que le producteur a respecté les techniques culturales adéquates, l'État devrait assumer une part de responsabilité.

4.3 Achat de plants et fourniture des semences et des conteneurs

La fourniture des conteneurs par l'État peut être une option intéressante dans certaines situations. Lorsque les plants sont livrés dans le conteneur de production, généralement les frais d'emballage sont évités et le système racinaire n'est pas exposé à l'air et au soleil. Il est relativement facile pour le reboiseur d'entretenir les plants sur le site de reboisement. Lorsque les conteneurs appartiennent au producteur et qu'ils quittent sa propriété, celui qui en prend charge en devient responsable. Il doit les retourner en bon état sans délais induit au propriétaire. Celui-ci doit préciser la valeur de

remplacement en cas de bris, de vol ou de perte, la date limite de retour et des pénalités de retard, le cas échéant. Si l'État fournit les conteneurs de croissance, celui-ci doit en spécifier le nombre qui sera mis à la disposition pour éviter les abus, s'assurer qu'ils ne comportent pas de défauts susceptibles de nuire à la culture et qu'ils sont dans un état satisfaisant. Il doit prévoir des pénalités si les conteneurs sont brisés, perdus ou détériorés par un usage abusif. Comme le soleil contribue de façon significative au vieillissement des conteneurs en les rendant fragiles et cassants, il est important d'édicter des normes d'entreposage à l'abri du soleil et de considérer un programme de remplacement lorsqu'ils atteignent la limite de leur durée de vie utile.

4.4 Fourniture de services conseils à la production de plants

Lors d'un transfert de la production vers des entrepreneurs privés, l'État devra évaluer la nécessité de transférer aussi les connaissances de production. En effet, l'implantation des nouvelles techniques se fait auprès des pépinières de l'État et peu de transfert technologique a été effectué à l'extérieur de ce milieu. Ce transfert de connaissances sera très variable selon que la formation de base du personnel en charge de la pépinière privée soit de niveau universitaire, technique ou générale. La fourniture de ces services peut aussi impliquer une responsabilité de l'État si la culture n'est pas réussie. Il faudra alors déterminer et partager les responsabilités à moins que cela soit clairement indiqué au contrat.

4.5 Fourniture des infrastructures de production

Cette option implique que le producteur privé utilisera les infrastructures existantes dans une pépinière de l'État pour réaliser la production de plants. Il y a plusieurs options à ce niveau. Chacune de ces options sera probablement régit par des dispositions légales que doit suivre l'État lors de la cession, l'aliénation, la disposition ou la location de biens publics. Parmi les différents modèles possibles, on note :

La vente du terrain, des infrastructures et des

équipements : Normalement les infrastructures et les équipements sont vendus dans leur état sans que le gouvernement assure les frais d'entretien et de réparation. L'État doit mettre à la disposition de l'acheteur toutes les informations pertinentes afin qu'il puisse évaluer en toute connaissance l'état des infrastructures, la qualité de construction, la durée de vie restante des équipements, les coûts d'entretien à réaliser, etc.

La location à terme du terrain, des infrastructures et des équipements : Ceci permet de ne pas aliéner des biens publics. D'une part, pour le producteur en charge, cela lui évite un investissement en capital trop élevé. D'autre part, l'État peut exiger de la part du producteur l'atteinte d'un certain niveau de performance selon l'atteinte ou non des objectifs de livraison en qualité et en quantité. Si le niveau désiré n'est pas atteint le producteur peut se voir retirer le bail et le contrat de production. Celui-ci sera enclin à mettre les efforts requis pour conserver son contrat. Il sera important de stipuler les responsabilités des parties pour l'entretien des biens et leur remplacement le cas échéant. Il faut se rappeler que les équipements ont une durée de vie limitée et qu'il est de mise de procéder au remplacement normal des différents équipements (broyeurs, conteneurs, gicleurs, etc.) selon leur espérance de vie moyenne.

Le personnel de la pépinière : certains aspects doivent être pris en compte. L'État doit déterminer s'il impose un transfert du personnel de la pépinière publique au nouveau propriétaire ou locataire. Le personnel en place peut représenter une source non négligeable d'expertise, particulièrement si ces gens ont reçu une formation pour les nouvelles méthodes de production en hors sol. Par contre, le nouveau producteur aura à juger s'il a besoin de cette expertise, de ce bassin de travailleurs, s'il peut atteindre ses objectifs de rentabilité, de productivité et d'expertise. Si cette condition représente à ses yeux une contrainte, il en tiendra compte dans ses coûts de productions et ses prix.

5. Stratégies de privatisation des pépinières en Tunisie

Une stratégie de privatisation des pépinières publiques tunisiennes s'intègre dans une perspective harmonieuse du développement durable du secteur forestier.

L'analyse qualitative et quantitative de la production de plants depuis le début du programme de modernisation montre que l'investissement dans des pépinières forestières et les choix technologiques (conteneurs anti-chignon, surélévation permettant le cernage aérien, substrat de qualité, infrastructure d'ombrière et système de ferti-irrigation), se justifient pleinement à tous les niveaux. Des bénéfices ont été notés quant à la capacité de production des pépinières, des coûts de production des plants et du taux de réussite élevé des plantations.

A fin d'optimiser le programme de modernisation, les pépinières ont été classées en trois catégories selon leurs contraintes majeures et spécifiques (débit et qualité d'eau d'irrigation, électrification, disponibilité de la biomasse à composter, main-d'œuvre, frais de gestion, etc.), de la capacité de production et des possibilités d'expansion :

- Catégorie A : pépinières de première importance sans contraintes dont la réhabilitation à court terme est obligatoire ; 30 pépinières (30 millions de plants) dont 16 déjà modernisées ;
- Catégorie B : pépinières de seconde importance, mais dont l'utilisation future est planifiée et nécessitant une réhabilitation à moyen terme ; 30 pépinières (30 millions de plants) à réhabiliter à moyen terme ;
- Catégorie C : pépinières à contraintes majeures ayant des frais de gestion élevés ; leur fermeture se fera au fur et à mesure de la progression des travaux de modernisation des pépinières des deux catégories précédentes.

Le programme de modernisation des pépinières se poursuivra selon des modes qui peuvent faire appel aux promoteurs privés conformément à la politique du désengagement de l'État en leur confiant certaines activités. L'Administration forestière étudie les possibilités de privatisation des activités de production de plants en pépinières forestières destinés aux besoins de l'État à des promoteurs ou opérateurs privés compétents. Actuellement, trois possibilités sont envisageables en matière de privatisation progressive des pépinières forestières:

- Concession à long terme : elle est devenue possible à la suite de la révision du Code forestier, notamment

de l'article 75 qui autorise une telle pratique;

- Gestion de la production de plants forestiers : délégation de la production des plants dans les pépinières, (1 année, renouvelable 5 ans) par un opérateur privé ; les intrants, équipements et fournitures peuvent être fournis soit par l'Administration forestière, soit par le producteur privé;
- Création de nouvelles pépinières par des investisseurs privés.

La mise en place d'une approche de privatisation peut se dérouler en deux étapes. Une première étape s'articulerait sous la forme de gestion de la production des plants dans les pépinières de l'Etat sur la base d'un cahier des charges spécifique par des opérateurs privés. Cela va permettre aux deux parties contractantes de mieux cerner la problématique (coûts réels de production, évaluation des difficultés techniques, administrative et logistique, niveau de compétence) en de vue d'apporter des rectifications si elles sont nécessaires. Il s'agit d'une forme d'apprentissage et de transfert technologique progressif.

Une deuxième étape peut se présenter sous la forme de concessions, conformément au Code forestier, avec un contrat de production qui spécifie les exigences qualitatives et les caractéristiques optimales des plants à produire.

Conclusion

Le développement futur du secteur forestier doit permettre davantage la poursuite de la modernisation et de la mise à niveau des pépinières forestières tunisiennes. L'Administration forestière s'est significativement investie ces dernières années pour amorcer ce virage technologique. Pour optimiser les retombées des efforts financiers et celles reliées à la formation d'une main d'œuvre qualifiée, la privatisation progressive des pépinières peut jouer un rôle de locomotive du développement durable relié au secteur de production de plants. La privatisation progressive des pépinières combinée au contrôle de la qualité des plants par le gouvernement a fait ses preuves dans plusieurs pays développés.

Conclusion Générale

Dans le cadre de la stratégie de développement forestier initié en 1995, la Tunisie a opté pour une modernisation progressive et complète de 16 pépinières forestières en vue d'améliorer la qualité, le taux de survie et la croissance des plants forestiers, pastoraux et ornementaux. Cette modernisation se caractérise par l'introduction et l'adaptation aux conditions tunisiennes de nouvelles technologies de production de plants. Ces technologies mettent l'accent sur l'utilisation d'ombrières rétractables et de conteneurs rigides, ainsi que sur la valorisation des déchets sylvicoles pour produire des substrats standards après compostage, les mycorhizes, le développement de programmes de fertilisation spécifiques aux essences produites et la gestion informatique.

Ce guide de production de plants décrit les améliorations significatives apportées aux différentes techniques culturales adaptées aux conditions spécifiques des pépinières forestières en Tunisie. Ces améliorations sont déjà utilisées à l'échelle opérationnelle avec succès lorsque le pépiniériste respecte les modalités d'application de chaque technique culturale reliée à chacune des phases de la production de plants allant du compostage de la matière verte jusqu'à la livraison des plants. Ce guide pourra être utilisé comme un document de base pour tout pépiniériste du secteur public ou privé qui veut se lancer dans le domaine de la production de plants en utilisant ces techniques modernes. D'autres informations détaillées fort intéressantes reliées aux différentes techniques de production de plants dans les pépinières modernes (compostage, fertilisation, confection des substrats, gestion des cultures, fertilisation, irrigation, qualité des plants, aspects économiques, etc.) sont décrites dans les rapports d'étape et de synthèse publiés durant la période 1995-2004. Ces rapports existent actuellement à la Direction Générale des Forêts de Tunisie.

Le recours au compostage de la biomasse verte et des écorces pour produire un substrat standard dans chaque pépinière s'intègre dans le cadre de la stratégie nationale de la Tunisie en matière de protection de l'environnement. Cette nouvelle approche permet d'éviter le ramassage du terreau forestier sous les peuplements forestiers. Ce ramassage engendre des perturbations qui pourraient avoir des conséquences négatives sur la fertilité des stations et la productivité des peuplements forestiers. L'utilisation du substrat à base de produits compostés permet aussi d'éviter le recours aux importa-

tions des substrats tourbeux et de diminuer de façon significative la dépendance de la Tunisie vis-à-vis des pays producteurs de substrats tourbeux.

En général, la modernisation des pépinières forestières a contribué de façon significative à l'amélioration des techniques de production de plants, notamment :

- la faisabilité opérationnelle du compostage de la biomasse (Acacia, maquis, etc.) et des écorces, ainsi que l'utilisation des produits compostés dans la confection du substrat de croissance. Ce dernier possède des caractéristiques physico-chimiques favorables à la croissance des plants résineux, feuillus, pastoraux et d'ornements;
- l'amélioration de la qualité du système racinaire suite à l'utilisation des conteneurs rigides en remplacement des sachets de polyéthylène;
- la détermination des calendriers de fertilisation et d'irrigation spécifiques aux essences feuillues, résineuses, pastorales et d'ornements. La chlorose des pins a été corrigée par un programme de fertilisation très précis;
- la mise à l'échelle opérationnelle de l'inoculation ectomycorhizienne à l'aide de spores de *Rhizopogon* et de *Pisolithus* en vue de corriger les symptômes de déficience en fer chez les résineux;
- l'élaboration de modèles de suivi de gestion informatisée des productions (standard de croissance, irrigation, fertilisation, etc.) et des produits utilisés (herbicides, fongicides, etc.);
- l'élaboration de documents et de programmes de formation continue en matière de transfert de technologies dédiés aux gestionnaires et aux pépiniéristes.

L'utilisation de ces nouvelles technologies de production de plants, unique en Afrique du Nord et dans le bassin méditerranéen, est simple et adaptée aux spécificités régionales. Cela a permis l'obtention de résultats forts encourageants quant à la qualité des plants, avec des coûts de production très compétitifs par comparaison à ceux des techniques conventionnelles. Le suivi en site de reboisement pendant les premières années a révélé une grande amélioration du taux de survie et de la croissance des plants de toutes les essences produites.

Cette expérience réussie met la Tunisie en situation de pionnière en matière de transfert de technologies et du savoir faire concernant la modernisation du secteur des pépinières forestières, pastorales et d'ornements. L'état

actuel de la croissance et du comportement des principales essences forestières a montré l'intérêt de ces technologies et les possibilités de leur généralisation dans des pays ayant des problèmes similaires à ceux de la Tunisie. D'ailleurs, certains organismes de pays africains et d'Amérique Latine ont utilisé récemment cette approche.

En tenant compte de la révision du Code Forestier en Tunisie, la privatisation progressive du secteur des pépinières forestières constitue une voie à privilégier à court terme. D'ailleurs, plusieurs pays développés ont adopté cette stratégie de privatisation selon divers scénarios.

Par exemple, la privatisation en Tunisie peut se faire par cession des pépinières modernes à des techniciens ou à des ingénieurs forestiers ou par l'intervention des pépinières privées dans la production de plants. La privatisation des pépinières nécessite un contrat prédéfini entre les producteurs de plants et la Direction Générale des Forêts, principal utilisateur des plants, et les autres utilisateurs potentiels. Ce contrat devrait être valable pour plusieurs campagnes de production en précisant la quantité, les essences à produire et le prix d'achat. Ce contrat doit spécifier les normes de production et de qualité des plants.

Références Bibliographiques

- Ammari, Y., Lamhamedi, M. S., Akrimi, N. et Zine El Abidine, A. 2003. Compostage de la biomasse forestière et son utilisation comme substrat de croissance pour la production de plants en pépinières forestières modernes. *Revue de l'I.N.A.T.* 18 (2) : 99-119.
- Anonyme. 1996. Evaluation des pépinières forestières. Rapport de synthèse. Administration des Eaux & Forêts et de la Conservation des Sols. Direction du Développement Forestier. Rabat, Maroc. 34 p.
- Anonyme. 1978. Guide pratique du reboiseur au Maroc. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire. Direction des Eaux & Forêts et de la Conservation des Sols. 373 p.
- Abourouh, M., Lamhamedi, M. S., Fortin, J. A. 1995. Techniques de mycorhization en pépinière des plants forestiers. Centre National de la Recherche Forestière. Maroc. ISBN: 9981-824-05-4. 37 p.
- Ameur, H., H.; Khorchfi, M; Fecteau, B.; Lamhamedi, M. S.; Poirier, M. 1996. Rapport annuel de production des plants forestiers. Pépinière Pilote du Sers. Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Projet Bird: N°3601 TUN. Direction Générale des Forêts. Tunisie. 46 p.
- Amorini, E. et Fabbio, G. 1992. The ISSA system for production of container tree seedlings. *Tree Planters' Notes.* 4: 146-149.
- Bastin, D. 1987. Fabrication et utilisation du compost de broussailles. Chantier expérimental de Cap Serrat, Tunisie. Mémoire de fin d'études. Institut Provincial d'Enseignement Supérieur Agricole et Technique. Belgique. 195 p.
- Ben Salem B. 1971. Root strangulation: A neglected factor in container nursery stock. M. Sc. Thesis. University of California, Berkeley. USA. 50 p.
- Bergeron, O., Lamhamedi, M. S., Margolis, H. A., Bernier, P. Y. et Stowe, D. C. 2004. Irrigation Control and Physiological Responses of Nursery-Grown Black Spruce Seedlings (1+0) Cultivated in Air-Slit Containers. *HortScience* 39(4): 599-605.
- Bernier, P. Y.; Lamhamedi, M. S. et Simpson, D. G. 1995. Shoot: root ratio is of limited use in evaluating the quality of container conifer stock. *Trees Planters'Notes.* 3: 102-106.
- Bernier, P. Y. et Lamhamedi, M. S. 1992. Soil texture and soil water potential at the soil-root interface of white spruce seedlings. *Ann. Rech. For.* 26: 199-204.
- Bigg, W. L. et Schalau, J. W. 1990. Mineral nutrition and the target seedling. In: *Target Seedling Symposium: Proceedings, Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations.* Rose, R.; Campbell, S. J. and Landis, T. D. Eds. August 13-17, 1990. Roseburg, Oregon. USDA Forest Service. General Technical Report RM-200. pp 139-160.
- Bonner, F. T. et Vozzo, J. A. 1987. Seed biology and technology of *Quercus*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. SO-66. 21 p.
- Bonner, F. T.; Vozzo, J. A.; Elam, W. W. et Land, S. B. Jr. 1994. Tree seed technology training course. A training manual. Gen. Tech. Rep. SO-106. New Orleans, LA: US Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 150 p.
- Bowen, G. D. 1973. Mineral nutrition of ectomycorrhizae. In: *Ectomycorrhizae: Their ecology and Physiology.* Eds. Marks, G. C. & Kozlowski, T. T. Academic Press, London. pp: 151-206.
- Bunt, A. C. 1988. Media and mixes for container-grown plants. Boston, Unwin Hyman. 309 p.
- Carlson, W. C. et Miller, D. E. 1990. Target seedling root system: Size hydraulic conductivity, and water use during seedling establishment. In: *Target Seedling Symposium: Proceedings, Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations.* Rose, R.; Campbell, S. J. and Landis, T. D. Eds. August 13-17, 1990. Roseburg, Oregon. USDA Forest Service. General Technical Report RM-200. pp 53-65.

- Castellano, M. A et Molina, R. 1989. Mycorrhizae. In: *The Container Tree Nursery Manual*. Volume 5. Agric. Handbook. 674. Washington, DC: US Department of Agriculture, Forest Service. pp: 101-167.
- CEMAGREF. 1987. *Essences forestières. Guide technique du forestier méditerranéen français*. Aix-en-Provence, France.
- Dalzell, H. W., Biddlestone, A. J., Gray, K. R. et Thurairajan, K. 1988. *Soil management: compost production and use in tropical and subtropical environments*. FAO Soils Bulletin 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 177 p.
- D'Aoust, A., Delisle, C., Girouard, R., Gonzalez, A et Bernier-Cardou, M. 1994. *Semis d'épinettes en conteneurs : l'importance relative des variables morphologiques et physiologiques mesurées pour caractériser les semis destinés au reboisement*. Rapport d'information LAU-X-110, Région du Québec. Canada. 28 p.
- Duryea, M. L. 1985. *Evaluating seedling quality: principes, procedures and predictives ability of major tests*. For. Res. Lab., Oregon State University, Corvallis, OR. 143 p.
- El Houla, S., Touati, M., Fecteau, B., Lamhamedi, M. S., Poirier, M. 1996. *Rapport annuel de production des plants forestiers. Pépinière Pilote de Ouechtata. Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Projet Bird: N°3601 TUN*. Direction Générale des Forêts. Tunisie. 70p.
- Fortin, J. A., Charest, C. et Piché, Y. 1995. *La symbiose mycorrhizienne. Etat des connaissances*. Ed. ORBIS Publishing; Québec. 195 p.
- Glinski, J. et Lipiec, J. 1990. *Soil physical conditions and plant roots*. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. 250 p.
- Grenier, Y. 1989. *La valorisation des boues d'usine d'épuration des eaux pour la fertilisation des forêts*. Mémoire N° 98. MER, Direction de la Recherche et du Développement, Québec. 190 p.
- Harley, J. L. et Smith, S. E. 1983. *Mycorrhizal symbiosis*. Academic Press, London.
- Havis, J. R. et Hamilton, W. W. 1976. *Physical properties of container media*. J. Arboriculture. 2: 139-140.
- Hoitink, H. J. A. 1980. *Composted bark, a lightweight growth medium*. Plant Disease 2: 142-147.
- Hoitink, H. J. A., Inbar, Y. et Boehm, M. J. 1991. *Status of compost-amended potting mixes naturally suppressive to soilborne diseases of floricultural crops*. Plant Disease 9: 869-873.
- ISTA. 1985. *Règles internationales pour les essais de semences*. Seed Sci. & Technol. 13, Supplément 2: 1-236.
- Jaenicke, H. 1999. *Good tree nursery practices. Practical guidelines for research nurseries*. International Centre for Research in Agroforestry. 90 p.
- Josiah S. J. et Jones N. 1992. *Root trainers in seedling production systems for tropical forestry and agroforestry*. Land Resources Series. N°4. The World Bank. Asia Technical Department. Agriculture Division. 51 p.
- Kalra, Y. P. et D. G. Maynard. 1992. *Méthodes d'analyse des sols forestiers et des tissus végétaux*. Rapport d'information NOR-X-319F. Forêts Canada, Région du Nord Ouest. 129 p.
- Kope, H. H. et Fortin, J. A. 1990. *Antifungal activity in culture filtrates of the ectomycorrhizal fungus Pisolithus tinctorius*. Can. J. Bot. 68: 1254-1259.
- Kope, H. H. et Fortin, J. A. 1989. *Inhibition of phytopathogenic fungi in vitro by cell free culture media of ectomycorrhizal fungi*. New Phytol. 113: 57-63.
- Lamhamedi, M. S., Labbé, L., Margolis, H. A., Stowe, D. C., Blais, L. et Renaud, M. 2005. *Spatial variability of substrate water content of white spruce seedlings*. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:108-120.

- Lamhamedi, M. S., Margolis, H. A., Renaud, M., Veilleux, L. et Auger, I. 2003. Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1 + 0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière. *Can. J. For. Res.* 33 : 279-291.
- Lamhamedi, M. S., M. Renaud et H. A. Margolis. 2002. La réflectométrie dans le domaine temporel : une technique d'optimisation de l'irrigation et de réduction du lessivage en pépinières forestières au Québec. *Cahiers Agricultures* 11 : 275-283.
- Lamhamedi, M. S., Lambany, G., Margolis, H. A., Renaud, M., Veilleux, L. et P. Y. Bernier. 2001. Growth, physiology and leachate losses in *Picea glauca* seedlings (1 + 0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes. *Can. J. For. Res.* 31 : 2200-2212.
- Lamhamedi, M.S., Ammari Y., Fecteau B., Fortin, J. A. et H. Margolis. 2000. Problématique des pépinières forestières en Afrique du nord et stratégies d'orientation. *Cahiers Agricultures* 9 : 369-380.
- Lamhamedi, M. S. 2000. Fertilisation des essences méditerranéennes produites en conteneurs dans les pépinières modernes en Tunisie. Projet Fonds Nordique NIB/NDF. Projet d'aménagement de six pépinières forestières hors sol en Tunisie. Direction Générale des Forêts, Tunisie. Pampev Internationale, Montréal, Canada. 30 p.
- Lamhamedi, M. S., Bertrand, S., et Fecteau, B. 1999. Fondements théoriques et pratiques du compostage des branches et des écorces des essences forestières et leur utilisation dans les pépinières forestières en Tunisie. Projet fonds nordique NIB/NDF. Direction Générale des Forêts, Tunisie. Pampev Internationale, Montréal, Canada. 35 p.
- Lamhamedi, M. S., Fortin, J. A., Ammari, Y., Bejelloun, S., Poirier, M., Fecteau, B., Bougacha, A., Godin, L. 1997. Evaluation des composts, des substrats et de la qualité des plants (*Pinus pinea*, *Pinus halepensis*, *Cupressus sempervirens* et *Quercus suber*) élevés en conteneurs. Projet Bird 3601. Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Direction Générale des Forêts. Tunisie, Pampev Internationale Ltée. 121 p.
- Lamhamedi, M. S.; Fortin, J. A.; Ammari, Y.; Fecteau, B.; Poirier, M., Godin, L., Bougacha, A. 1997. Stratégies d'orientation en matière de recherche et de production de plants forestiers dans les trois pépinières pilotes. Rapport d'étape. Projet: Bird N^o 3601 TUN. Direction Générale des Forêts. Tunisie. 24 p.
- Lamhamedi, M. S.; Ksontini, M.; Fecteau, B.; Fortin, J. A.; et de Chantal. M. 1995. Eléments de réflexion sur le substrat d'élevage des plants dans trois pépinières forestières pilotes en Tunisie. Projet: Bird N^o 3601 TUN. Direction Générale des Forêts. Tunisie. 16 p.
- Lamhamedi, M. S. et P. Y. Bernier. 1994. Ecophysiology and Field performance of black spruce (*Picea mariana*): a review. *Ann. Sci. For.* 51: 529-551.
- Lamhamedi, M. S. et J. A. Fortin. 1994. La qualité des plants forestiers: critères d'évaluation et performance dans les sites de reboisement. In: Actes de la première journée nationale sur les plants forestiers. Ed. Abourouh M. Centre de Recherche et d'Expérimentation Forestières, pp 35-50.
- Lamhamedi, M. S., P. Y. Bernier et J. A. Fortin. 1992. Hydraulic conductance and soil water potential at the soil-root interface of *Pinus pinaster* seedlings inoculated with different dikaryons of *Pisolithus* sp. *Tree Physiol.* 10:231-244.
- Lamhamedi, M. S. et J. A. Fortin. 1991. Genetic variations of ectomycorrhizal fungi: extramatrical phase of *Pisolithus* sp. *Can. J. Bot.* 69: 1927-1934.

- Lamhamedi, M. S., Fortin, J. A. et Bernier, P. Y. 1991. La génétique de *Pisolithus* sp.: une nouvelle approche de biotechnologie forestière pour assurer une meilleure survie des plants en conditions de sécheresse. *Sécheresse* 2: 251-258.
- Landis, T. D. 1990. Growing media. In: Containers and growing media. Vol 2. Agriculture Handbook. 674. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service. 41-85.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. In: Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests. Workshop held October 16 - 18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. pp 29-48.
- Landis, T. D., Haase, D. L. et Boyer, D. 1995. Organic matter management in forest tree nurseries: theory and practice. Nursery Technology Cooperative, Oregon State University, OR. 67 p.
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E. et Barnett, J. P. 1989. Seedling nutrition and Irrigation, Vol 4, The Container Tree Nursery Manual. Agric. Handbook. 674. Washington, DC: US Department of Agriculture, Forest Service. 119 p.
- Lemaire, F., Dartigues, A., Rivières, L. M. et Charpentier, S. 1989. Culture en pots et conteneurs. Principes Agronomiques et Applications. INRA, Paris. 181 p.
- Margolis, H. et Brand, D. G. 1990. An ecophysiological basis for understanding plantation establishment. *Can. J. For. Res.* 20: 375-390.
- Marks, G. C. et Kozlowski, T. T. 1973. *Ectomycorrhizae: Their ecology and physiology.* Academic Press, London.
- Marx, D. H. 1980. Ectomycorrhizal fungus inoculations: a tool for improving forestation practices. In: *Tropical Mycorrhizal Research.* Ed. Mikola, P. Oxford Clarendon Press, London. pp 13-17.
- Marx, D. H. 1972. Ectomycorrhizae as biological deterrents to pathogenic root infections. *Ann. Rev. Phytop.* 10: 429-454.
- Mexal, J. G. et Landis, T. D. 1990. Target seedling concepts: Height and diameter. In: *Target Seedling Symposium: Proceedings, Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations.* Rose, R.; Campbell, S. J. and Landis, T. D. Eds. August 13-17, 1990. Roseburg, Oregon. USDA Forest Service. General Technical Report RM-200. pp 17-35.
- Mitchell, M. L., Hassan, A. E., Davey, C. B. et Gregory, J. D. 1982. Lobolly pine growth in compacted greenhouse soils. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 25: 304-307.
- Moisan, J., Brulotte, F; Fecteau, B., Poirier, M. et Lamhamedi, M. S. 1995. Cahier de Gestion de trois pépinières pilotes. Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Projet Bird: N°3601 TUN. Direction Générale des Forêts. Tunisie.
- Mtar, S., Lassoued, H., Poirier, M., Fecteau, B. et Lamhamedi, M. S. 1996a. Rapport annuel de production des plants forestiers. Pépinière Pilote de Oued El Bir. Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Projet Bird: N°3601 TUN. Direction Générale des Forêts. Tunisie. 43 p.
- Mtar, S., Lassoued, H. et Poirier, M. 1996b. Etude préliminaire sur les coûts de certains aspects à la culture de semis forestiers en récipients. Exécution des travaux d'aménagement de trois pépinières pilotes en Tunisie. Projet Bird: N°3601 TUN. Direction Générale des Forêts. Tunisie. 19 p.
- Mustin, M. 1987. *Le compost. Gestion de la matière organique.* Editions François DUBUC, Paris. 954 p.

- Naili, Y. 1996. Contribution à l'étude du comportement et de la productivité du Pin pignon en peuplements artificiels dans la région des Mogods-Sedjnane, Tunisie. Mémoire de 3ème cycle, Ecole Nationale Forestière d'Ingénieurs. 83 p.
- Oueslati, M. A., Ksontini, M., Haddad, M. et Charbonnel, Y. 1995. Composatge des branches d'Acacia cyanophylla et des boues fraîches des stations d'épuration d'eaux usées. *Rev. For. Fran.* 5: 523-529.
- Philipson, J. 1988. Root growth in Sitka spruce and Dougals-fir transplants: Dependence on the shoot and stored carbohydrates. *Tree Physiol.* 4: 101-108.
- Pokorny, F. A. 1987. Available water and root development within the micropores of pine bark particles. *Journal of Environmental Horticulture* 5: 89-92.
- Polan, P.; Gagnon, J. et Jones, J. P. 1993. L'utilisation du compost de boues de stations d'épuration des eaux comme substrat de culture pour la production des plants forestiers en récipients. *Can. J. Civ. Eng.* 20: 518-527.
- Poorter, H. 1989. Plant growth analysis: towards a synthesis of the classical and the functional approach. *Physiol. Plant.* 75: 237-244.
- Poorter, H. et Lewis, C. 1986. Testing differences in relative growth rate: A method avoiding curve fitting and pairing. *Physiol. Plant.* 67: 223-226.
- Puustjarvi, V. et Robertson, R. A. 1975. Physical and chemical properties. In: *Peat in horticulture*. London, Academic Press. 170 p.
- Read, D. J. et Boyd, R. 1986. Water relations of mucor-rhizal fungi and their host plants. In: *Water, Fungi and Plants*. Eds. Ayres, P. G. and Boddy, L. Cambridge University Press, Cambridge. pp: 287-304.
- Ritchie, G. A. 1985. Root growth potential: principles, procedures and predictive ability. In: *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictives abilities of major tests*. Workshop held October 16 - 18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. pp 93-105.
- Ritchie, G. A. et Tanaka, Y. 1990. Root growth potential and the target seedling. In: *Proceedings, Target Seedling Symposium, Combined Meeting Western Nursery Association*. 1990 August 13-17; Roseburg, OR. Gen. Tech. Rep. 200. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. pp 37-51.
- Romero, A. E., Ryder, J., Fisher, J. T. et Mexal, J. G. 1986. Root systems modification of container stock for arid land plantings. *For. Ecol. Manag.* 16: 281-290.
- Rook, D. A. 1991. Seedling development and physiology in relation to mineral nutrition. In: *Mineral Nutrition of Conifer Seedlings*. Ed. Van den Driessche. CRC Press, Boston. pp 85-111.
- Rose, R., Carlson, W. C., Fisher, J. T. et Mexal, J. G. 1990. The target seedling concept. In: *Proceedings, Target Seedling Symposium, Combined Meeting Western Nursery Association*. 1990 August 13-17; Roseburg, OR. Gen. Tech. Rep. 200. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. pp 1-8.
- Rowan, S. J. 1986. Seedbed density affects performance of slash and loblolly pine in Georgia. In: *International Symposium on Nursery Management Practices for the Southern Pines*. South, D. B. Ed. Alabama Agric. Exp. Sta., Auburn Univ., Auburn, Alabama. pp: 126-135.
- Sassi, R. S. 1991. Manuel d'analyses des sols, plantes, eaux et engrais. Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie. Laboratoire d'Analyse des Sols, Plantes & Eaux. Tunis. 78p.
- Sauvesty, A. et Tabi, M. 1995. Le compostage au Québec. Consortium sur le développement du compostage au Québec, Québec. Canada. 76 p.
- Schopmeyer, C. S. 1974. Seeds of woody plants in the United States. *Agriculture Handbook N° 450*. Forest

- Service, U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C. 872p.
- Solbraa, K. 1986. Bark as growth medium. *Acta Horticulturae* 178: 129-135.
- Spomer, L. A. 1975. Availability of water absorbed by hardwood bark soil amendement. *Agronomy Journal* 67: 589-590.
- Stoffella, P. J. et Kahn, B. A (Eds.). 2001. - Compost utilization in horticultural cropping Systems. Lewis Publishers, New York, USA, 413 p.
- Stolzy, L. H. 1974. Soil atmosphere. In: *The Plant Root and its environment* (ed. Carson, E. W.), Univ. of Virginia, Charlottesville, pp:335-361.
- Stone, E. C. 1970. Prevention of container-induced root malformation in *Pinus pinaster* and *Pinus halepensis* seedling following transplanting. University of California, Berkley. USA. 42 p.
- Swanson, B. T. 1989. Critical physical properties of container media. *American nurserman* 11: 59-63.
- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation - What you can tell by looking. In: *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictives abilities of major tests*. Workshop held October 16 - 18, 1984. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. pp 59 - 71.
- Tinus, R. W. 1996. Root growth potential as an indicator of drought stress history. *Tree Physiol.* 16: 795-799.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L. et Beaton, J. D. 1985. *Soil fertility and fertilizers*. Macmillan Publishing Company, New York. 754 p.
- Vanderhofstadt, B. et Bastin, D. 1987. *Projet de compostage à Cap Serrat*. Coopération Tuniso-Belge. ODESYPANO Sejnane. 45p. Verdonck, O. 1983. Reviewing and evaluation of new materials used as substrates. *Acta Horticulturae*. 150: 467-473.
- Warkentin, B. P. 1984. Physical properties of forest-nursery soils: Relation to seedling growth. In: *Forest Nursery Manual: Production of bareroot seedlings* (eds. Duryea, M. L. And Landis, T. D.), pp: 53-61. Martinus/Dr. W. Junk Publishers, The Hague-Boston-Lancaster.
- Waring, R. H. et Running, S. W. 1978. Sapwood water storage: Its contributions to transpiration and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir. *Plant Cell Env.* 1: 131-140.
- Wilson, P. J. 1986. Containers for tree nurseries in developing countries. *Commonw. For. Rev.* 3: 233-240. Sites Internet à explorer :
- <http://www.rngr.net/Publications/ctnm>. Ce site contient plusieurs publications scientifiques et techniques spécifiques à la production de plants en pépinière forestière.
- http://compost.css.cornell.edu/Composting_Homepage.html : Ce site contient des informations à caractère scientifique et opérationnel sur le compostage.
- <http://www.cof.orst.edu/coops/ntc/ntc.htm> : Ce site contient des informations sur le programme de recherche, ainsi que les travaux réalisés dans une coopérative attachée à l'Oregon State University.
- <http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/floriculture/> : Ce site peut intéresser les pépiniéristes qui veulent se lancer dans la floriculture et l'horticulture d'une façon générale.

ANNEXES

Annexe 1 État des pépinières forestières et pastorales en Tunisie.

| Arrondissement | Nombre de pépinière | Nom de la pépinière | Type et vocation | Date de création | Surface utile (ha) | Capacité potentielle (nb. plants) | Capacité réelle (nb. plants) | M.O* non qualifiée (nbre) | M.O. spécialisée (nbr) | Catégorie |
|----------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------|
| TUNIS | 2 | Gammarth | Traditionnelle | 1947 | 1,2 | 900 000 | 500 000 | 15 | 10 | B |
| | | El Agba | Moderne | 1986 | 3,0 | 1 500 000 | 1 000 000 | 40 | 5 | B |
| ARIANA | 1 | Sidi Thabet | Moderne | 2002 | 1,0 | 1 000 000 | 500 000 | 20 | 0 | B |
| MANNOUBA | 2 | Sadkia | Traditionnelle | 1991 | 3,0 | 1 700 000 | 600 000 | 40 | 5 | A |
| BEN AROUS | 3 | Borj El Amri | Traditionnelle | 1962 | 5,0 | 2 000 000 | 1 200 000 | 41 | 12 | A |
| | | Mornag | Traditionnelle | 1984 | 2,0 | 660 000 | 550 000 | 46 | 0 | A |
| | | Boustita | Traditionnelle | 1996 | 2,0 | 500 000 | 10 000 | 10 | 0 | C |
| ZAGHOUAN | 4 | Radès | Traditionnelle | 1962 | 2,0 | 1 000 000 | 500 000 | 45 | 8 | B |
| | | Zaghuan | Moderne | 1945 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 6 | A |
| BIZERTE | 5 | Jougar | Traditionnelle | 1945 | 1,8 | 800 000 | 650 000 | 20 | 5 | C |
| | | Nadhour | Traditionnelle | 1982 | 1,8 | 1 200 000 | 800 000 | 20 | 6 | A |
| | | Saouaf | Traditionnelle | 1993 | 2,5 | 1 100 000 | 600 000 | 20 | 0 | C |
| | | Ain asker | Moderne | 1946 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 8 | A |
| | | La Corniche | Traditionnelle | 1948 | 0,5 | 150 000 | 85 000 | 11 | 6 | B |
| BEJA | 5 | Mateur | Traditionnelle | 1962 | 1,6 | 1 896 000 | 1 500 000 | 59 | 11 | A |
| | | Tamera | Moderne | 1959 | 3,1 | 2 650 000 | 1 500 000 | 87 | 18 | A |
| | | Bechar | Traditionnelle | 1950 | 0,5 | 500 000 | 500 000 | 10 | 1 | B |
| | | Ouechtata | Moderne | 1948 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 19 | A |
| | | Dmaïen | Traditionnelle | 1979 | 0,4 | 450 000 | 450 000 | 20 | 3 | A |
| JENDOUBA | 7 | Beja | Traditionnelle | 1960 | 1,2 | 950 000 | 650 000 | 46 | 11 | B |
| | | Mjaz El Bab | Traditionnelle | 1950 | 1,7 | 2 160 000 | 875 000 | 60 | 6 | B |
| | | Ain Jemmala | Traditionnelle | 1946 | 3,0 | 1 500 000 | 1 000 000 | 36 | 23 | A |
| | | El Faija | Traditionnelle | 1960 | 0,1 | 100 000 | 35 000 | 3 | 1 | C |
| | | Ain Soltane | Traditionnelle | 1960 | 1,0 | 750 000 | 500 000 | 5 | 1 | A |
| | | Hakim | Traditionnelle | 1982 | 3,0 | 2 200 000 | 700 000 | 0 | 12 | C |
| | | Ben Mtir | Traditionnelle | 1958 | 1,0 | 700 000 | 500 000 | 16 | 0 | A |
| AIN DRAHAM | 6 | Souk Jamaa | Traditionnelle | 1955 | 1,0 | 1 500 000 | 400 000 | 15 | 0 | C |
| | | Esskhira | Moderne | 1962 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 1 | A |
| | | Bousalem | Traditionnelle | 1983 | 8,0 | 80 000 | 50 000 | 14 | 0 | A |
| | | Ain Hamrava | Traditionnelle | 1959 | 0,5 | 350 000 | 200 000 | 20 | 3 | C |
| | | Rouai | Traditionnelle | 1985 | 0,1 | 350 000 | 250 000 | 20 | 0 | C |
| | | Adissa | Traditionnelle | 1969 | 0,3 | 400 000 | 300 000 | 20 | 10 | A |
| | | Majen Essef | Traditionnelle | 1957 | 0,5 | 500 000 | 300 000 | 20 | 4 | C |

Annexe 1 (suite)

| | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|--|---------------------|----------------|------|-----|-----------|-----------|-----|----|---|
| | | | Guelta Safra | Moderne | 1990 | 5,0 | 1 000 000 | 800 000 | 36 | 7 | A |
| | | | Ain Boulehyia | Traditionnelle | 1960 | 0,2 | 240 000 | 200 000 | 20 | 5 | C |
| SILIANA | 8 | | Siliana | Traditionnelle | 1960 | 1,0 | 800 000 | 800 000 | 36 | 6 | A |
| | | | Sodga | Traditionnelle | 1978 | 1,0 | 650 000 | 650 000 | 6 | 2 | B |
| | | | Gaafour | Moderne | 1982 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 0 | B |
| | | | Sidi Ayed | Traditionnelle | 1950 | 1,2 | 1 400 000 | 1 100 000 | 16 | 4 | A |
| | | | Makther | Traditionnelle | 1987 | 1,0 | 550 000 | 500 000 | 11 | 3 | B |
| | | | Kessera | Traditionnelle | 1958 | 1,0 | 500 000 | 500 000 | 9 | 3 | A |
| | | | Rouhia 1 | Traditionnelle | 1981 | 1,6 | 1 208 000 | 1 000 000 | 20 | 5 | A |
| | | | Rouhia 2 | Traditionnelle | 1993 | 2,4 | 2 000 000 | 1 900 000 | 20 | 0 | C |
| KEF | 4 | | Kellaat Khasba | Traditionnelle | 1987 | 2,6 | 2 600 000 | 1 400 000 | 50 | 0 | C |
| | | | Barnoussa | Traditionnelle | 1960 | 0,8 | 500 000 | 450 000 | 60 | 7 | C |
| | | | Mellegue | Traditionnelle | 1957 | 3,5 | 3 500 000 | 2 500 000 | 50 | 8 | A |
| | | | Sers | Moderne | 1958 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 5 | A |
| KASSERINE | 5 | | Majel El Akrouit | Traditionnelle | 1992 | 3,0 | 2 000 000 | 1 000 000 | 30 | 0 | C |
| | | | Kasserine | Moderne | 1983 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 5 | A |
| | | | Sbeitla | Traditionnelle | 1950 | 3,0 | 3 000 000 | 2 000 000 | 60 | 3 | A |
| | | | Thala | Traditionnelle | 1989 | 1,8 | 1 200 000 | 1 100 000 | 33 | 7 | A |
| | | | Feriana | Traditionnelle | 1962 | 2,0 | 1 500 000 | 1 250 000 | 32 | 8 | C |
| SIDI BOUZID | 3 | | Maknassy | Traditionnelle | 1957 | 0,5 | 330 000 | 330 000 | 17 | 0 | B |
| | | | Ferne 19 | Traditionnelle | 1981 | 4,0 | 3 000 000 | 1 100 000 | 37 | 6 | B |
| | | | Lessoueda | Traditionnelle | 1986 | 3,0 | 1 500 000 | 1 000 000 | 20 | 1 | B |
| GAFSA | 5 | | Abdessadok | Traditionnelle | 1984 | 0,6 | 600 000 | 400 000 | 30 | 0 | B |
| | | | El Ksar | Traditionnelle | 1958 | 1,5 | 1 500 000 | 1 000 000 | 100 | 7 | B |
| | | | Daoura | Traditionnelle | 1985 | 0,3 | 250 000 | 120 000 | 18 | 0 | C |
| | | | Segdoud | Traditionnelle | 1985 | 0,5 | 280 000 | 100 000 | 17 | 0 | C |
| | | | Haddaj | Traditionnelle | 1986 | 0,5 | 350 000 | 120 000 | 10 | 0 | C |
| TOZEUR | 2 | | Tozeur | Traditionnelle | 1957 | 0,4 | 260 000 | 250 000 | 12 | 7 | B |
| | | | Nefta | Traditionnelle | 1993 | 0,5 | 380 000 | 280 000 | 12 | 1 | B |
| GABES | 4 | | Gabes | Traditionnelle | 1959 | 1,0 | 1 000 000 | 500 000 | 85 | 15 | B |
| | | | Zerkine | Traditionnelle | 1990 | 1,8 | 1 500 000 | 700 000 | 40 | 6 | B |
| | | | Aine Toumine | Traditionnelle | 1958 | 1,7 | 1 300 000 | 700 000 | 25 | 3 | B |
| | | | Menzel Habib | Traditionnelle | 1995 | 1,2 | 1 000 000 | 600 000 | 35 | 1 | C |
| KEBILI | 1 | | Kebili | Traditionnelle | 1985 | 2,0 | 700 000 | 400 000 | 20 | 3 | B |
| MEDENINE | 4 | | Medenine | Traditionnelle | 1965 | 1,5 | 400 000 | 300 000 | 100 | 1 | B |
| | | | El Morra | Traditionnelle | 1987 | 2,0 | 2 000 000 | 1 000 000 | 70 | 0 | B |
| | | | Chammakh | Traditionnelle | 1994 | 1,0 | 450 000 | 300 000 | 27 | 0 | C |
| | | | Sahnah | Traditionnelle | 1983 | 1,5 | 860 000 | 600 000 | 40 | 1 | C |

Annexe 1 (suite)

| | | | | | | | | | | |
|--------------|------------|---------------------|----------------|----------|--------------|--------------------|-------------------|-------------|------------|----------|
| TATAOUINE | 3 | Remeda | Traditionnelle | 1990 | 1,0 | 300 000 | 200 000 | 18 | 0 | C |
| | | Smar | Traditionnelle | 1993 | 0,5 | 500 000 | 200 000 | 13 | 0 | C |
| | | Mesreb | Traditionnelle | 1984 | 1,5 | 1 000 000 | 700 000 | 25 | 4 | B |
| SFAX | 4 | Manzil Chakir | Traditionnelle | 1996 | 3,0 | 1 500 000 | 500 000 | 20 | 3 | B |
| | | Sfax | Traditionnelle | 1967 | 3,0 | 1 500 000 | 1 000 000 | 50 | 2 | B |
| | | Bir Ali | Volante | 1988 | 1,0 | 600 000 | 400 000 | 20 | 0 | C |
| | | Skhira | Volante | 1994 | 1,4 | 500 000 | 350 000 | 20 | 0 | C |
| MAHDIA | 4 | El Meslene | Traditionnelle | 1986 | 1,0 | 1 440 000 | 1 200 000 | 43 | 1 | C |
| | | Bir Ben Kemla 1 | Traditionnelle | 1995 | 0,9 | 100 000 | 80 000 25 | 1 | B | |
| | | Bir Ben Kamla 2 | Moderne | 2001 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 10 | 1 | A |
| | | Ksasba | Traditionnelle | 1958 | 1,3 | 192 000 | 1 600 000 | 57 | 3 | B |
| SOUSSE | 3 | Sousse | Traditionnelle | 1961 | 1,6 | 1 300 000 | 1 100 000 | 50 | 22 | B |
| | | R'Mil | Traditionnelle | 1979 | 2,4 | 1 500 000 | 900 000 | 45 | 16 | B |
| | | Chott Merien | Moderne | 1999 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 0 | A |
| MONASTIR | 3 | Menzel Nour | Traditionnelle | 1992 | 1,5 | 1 000 000 | 800 000 | 50 | 1 | B |
| | | Benbla | Moderne | 2001 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 10 | 0 | A |
| | | Monastir | Traditionnelle | 1977 | 0,4 | 300 000 | 200 000 | 15 | 0 | B |
| KAIROUAN | 8 | Karma | Traditionnelle | 1957 | 3,0 | 2 000 000 | 1 350 000 | 20 | 20 | A |
| | | Sbikha | Traditionnelle | 1960 | 3,0 | 2 000 000 | 1 590 000 | 50 | 20 | A |
| | | Hajeb | Traditionnelle | 1960 | 1,0 | 1 250 000 | 1 150 000 | 10 | 40 | A |
| | | Ousslatia | Traditionnelle | 1961 | 2,5 | 1 500 000 | 1 245 000 | 22 | 20 | A |
| | | Haffouz | Traditionnelle | 1989 | 1,0 | 770 000 | 750 000 | 25 | 5 | B |
| | | El Grine | Moderne | 2000 | 1,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 0 | A |
| | | Nasr Allah | Traditionnelle | 1980 | 1,5 | 760 000 | 730 000 | 20 | 30 | B |
| | | Ennasr | Traditionnelle | 1992 | 0,5 | 660 000 | 580 000 | 10 | 5 | C |
| NABEUL | 7 | Grombalia | Traditionnelle | 1937 | 1,2 | 600 000 | 550 000 | 20 | 6 | B |
| | | Bouchrik | Traditionnelle | 1986 | 5,3 | 6 000 000 | 1 500 000 | 10 | 6 | |
| | | Hammamet | Traditionnelle | 1940 | 0,4 | 500 000 | 200 000 | 27 | 5 | |
| | | Hammam Bt Jdidi | Traditionnelle | 1993 | 1,0 | 1 000 000 | 700 000 | 35 | 2 | |
| | | Oued El Ksab | Traditionnelle | 1956 | 0,5 | 500 000 | 300 000 | 12 | 2 | |
| | | Dar Chichou | Traditionnelle | 1956 | 0,5 | 1 000 000 | 600 000 | 18 | 6 | |
| | | Oued El Bir | Moderne | 1945 | 2,0 | 1 000 000 | 1 000 000 | 20 | 11 | |
| TOTAL | 103 | - | - | - | 174,3 | 112 126 000 | 76 130 000 | 2933 | 557 | - |

ANNEXE 2 SUIVI DE QUALITÉ DE L'EMPOTAGE

DATE : _____

OBSERVATEUR : _____

HEURE : _____

Pépinière de : _____

Recommandations : fréquence des vérifications à toutes les heures (3 récipients minimum)

TYPE DE SUBSTRAT CHOISI ET PROPORTION DU MÉLANGE

constituants

proportions %

compost d'acacia

écorce broyée

âge du compost : _____ mois
date broyage : _____ mois
âge du compost : _____ mois

CRITÈRES À SURVEILLER

VÉRIFICATIONS

1- MÉTHODE DE MÉLANGE

manuelle
bétonnière

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

2- UNIFORMITÉ DU MÉLANGE

OUI
NON

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

3- HUMIDITÉ DU MÉLANGE

SEC
HUMIDE
TRÈS HUMIDE

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

4- GRANULOMÉTRIE DU MÉLANGE **

FINE
MOYENNE
GROSSIÈRE

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

5- DENSITÉ DU SUBSTRAT

MANQUE DE COMPACTION
BIEN COMPACTÉ
TROP COMPACTÉ

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

6- NIVEAU DE REMPLISSAGE

SUFFISANT
INSUFFISANT

| | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

** test de porosité fortement suggéré

FINE (0 à 2,5 mm)

moyenne (2,5 à 5 mm)

grossière (> 5 mm)

ANNEXE 3 SUIVI DE QUALITÉ DE L'ENSEMENCEMENT

DATE : _____

OBSERVATEUR : _____

HEURE : _____

Pépinière de : _____

Recommandations : fréquence des vérifications à toutes les heures (3 récipients minimum)

CRITÈRES À SURVEILLER

VÉRIFICATIONS

| 1- | SURFACE DU SUBSTRAT | Arrondie <input type="checkbox"/> mal-arrondie <input type="checkbox"/> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|--|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | <input type="checkbox"/> |
| 2- | NOMBRE DE GRAINES PAR CAVITÉ (selon le taux de germination) | INSUFFISANT <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | BIEN <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | TROP <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3- | PROFONDEUR DE LA GRAINE (2 à 3 fois le diamètre graine) | INSUFFISANT <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | BIEN <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | TROP <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4- | AJOUT DE SABLE DE SILICE (3 à 5 mm d'épaisseur) | INSUFFISANT <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | BIEN <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | TROP <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

NOTES : (PLUIE, VENT, ETC...)

ANNEXE 5
SUIVI DE CROISSANCE DES PLANTS

ESSENCE: _____

LOCATION: _____

DATE: _____

OBSERVATEUR: _____

| No | Hauteur | Diamètre | No | Hauteur | Diamètre | No | Hauteur | Diamètre | No | Hauteur | Diamètre |
|----|---------|----------|----|---------|----------|----|---------|----------|-----|---------|----------|
| 1 | | | 26 | | | 51 | | | 76 | | |
| 2 | | | 27 | | | 52 | | | 77 | | |
| 3 | | | 28 | | | 53 | | | 78 | | |
| 4 | | | 29 | | | 54 | | | 79 | | |
| 5 | | | 30 | | | 55 | | | 80 | | |
| 6 | | | 31 | | | 56 | | | 81 | | |
| 7 | | | 32 | | | 57 | | | 82 | | |
| 8 | | | 33 | | | 58 | | | 83 | | |
| 9 | | | 34 | | | 59 | | | 84 | | |
| 10 | | | 35 | | | 60 | | | 85 | | |
| 11 | | | 36 | | | 61 | | | 86 | | |
| 12 | | | 37 | | | 62 | | | 87 | | |
| 13 | | | 38 | | | 63 | | | 88 | | |
| 14 | | | 39 | | | 64 | | | 89 | | |
| 15 | | | 40 | | | 65 | | | 90 | | |
| 16 | | | 41 | | | 66 | | | 91 | | |
| 17 | | | 42 | | | 67 | | | 92 | | |
| 18 | | | 43 | | | 68 | | | 93 | | |
| 19 | | | 44 | | | 69 | | | 94 | | |
| 20 | | | 45 | | | 70 | | | 95 | | |
| 21 | | | 46 | | | 71 | | | 96 | | |
| 22 | | | 47 | | | 72 | | | 97 | | |
| 23 | | | 48 | | | 73 | | | 98 | | |
| 24 | | | 49 | | | 74 | | | 99 | | |
| 25 | | | 50 | | | 75 | | | 100 | | |

Remarques: _____

ANNEXE 6
PARAMÈTRES A ANALYSER POUR ÉVALUER LA QUALITÉ DE L'EAU
D'IRRIGATION

| INDICE DE QUALITÉ | UNITÉS |
|---|--|
| CONDUCTIVITÉ ELECTRIQUE (CE) | $\mu\text{S/cm}$ $\mu\text{mho/cm}$ |
| EFFET DU SODIUM SUR LA PERMÉABILITÉ DU SOL | Asar |
| IONS TOXIQUES | UNITÉS |
| SODIUM (Na ⁺) | ppm |
| COLORE (Cl ⁻) | ppm meq |
| BORE (B) | ppm meq |
| IONS NUTRITIFS | UNITES |
| CALCIUM (CA ⁺⁺) | ppm meq |
| MAGNÉSIEUM (MG ⁺⁺) | ppm meq |
| SULFATE (SO ₄ ⁻) | ppm meq |
| IONS RESPONSABLES DES TACHES FOLIARES | UNITÉS |
| BICARBONATES (H CO ₃ ⁻) | ppm meq |
| CA ⁺⁺ MG ⁺⁺ | ppm |
| FER | ppm |

ANNEXE 9
Normes de qualité des eaux d'irrigation en pépinière forestière

| Indice de qualité | Unité | Niveaux de qualité | | |
|--|--|--------------------|-------------|----------|
| | | Bonne | Marginale | Mauvaise |
| Conductivité électrique (CE) | $\mu\text{S/cm}$ $\mu\text{mho/cm}$ | 0--500 | 500--1500 | >500 |
| Effet du Sodium sur la perméabilité du sol | ASAR | 0--6 | 6--9 | >9 |
| Seuil de toxicité | | | | |
| Ions Toxiques | | | | |
| Sodium (Na ⁺) | ppm meq | | 50 2,2 | |
| Chlore (Cl ⁻) | ppm meq | | 70 2,0 | |
| Bore (B) | ppm meq | | 0,75 --- | |
| Ions nutritifs | | | | |
| Calcium (Ca ⁺⁺) | ppm meq | | 100 5,0 | |
| Magnésium (Mg ⁺⁺) | ppm meq | | 50 4,2 | |
| Sulfates (SO ₄ ⁻) | ppm meq | | 250 5,2 | |
| Ions responsables des taches foliaires | | | | |
| Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) | ppm meq | | 60 1,0 | |
| Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ | ppm | | 206 | |
| Fer | ppm | | 0,1 | |

ANNEXE 10A

Charte pour l'évaluation des pourcentages d'humidité dans le substrat des conteneurs 15-340 exemple de calcul

POIDS

| |
|--|
| conteneur + substrat + silice + plant |
|--|

densité substrat 0,12 g/cm³

| | | |
|------------------------------|---|--------|
| poids anhydre 0% (A) | → | 1048 g |
| poids humide 100% saturé (B) | → | 3923 g |
| poids eau (B - A) | → | 2875 g |

| |
|---|
| $\%HUM = \frac{\text{poids eau}}{\text{poids total eau (substrat saturé)}}$ |
|---|

| CHARTRE HUMIDITÉ conteneur (15-340) | |
|--|---|
| % HUM | poids du conteneur (g) +substrate+silice+plant |
| 0 | 1048 |
| 5 | 1192 |
| 10 | 1336 |
| 15 | 1479 |
| 20 | 1623 |
| 25 | 1767 |
| 30 | 1911 |
| 35 | 2054 |
| 40 | 2198 |
| 45 | 2342 |
| 50 | 2486 |
| 55 | 2629 |
| 60 | 2773 |
| 65 | 2917 |
| 70 | 3061 |
| 75 | 3204 |
| 80 | 3348 |
| 85 | 3492 |
| 90 | 3636 |
| 95 | 3779 |
| 100 | 3923 |
| | |

| |
|-------------------------|
| Zone à priviléger ** |
|-------------------------|

** à valider durant la campagne

Note: il faudra ajouter la masse fraîche du plant au cours de la saison

ANNEXE 11
CHARTRE D' ARROSAGE
exemple théorique

| Temps d'arrosage (minutes) | Quantité d'eau * (L / m ²) (mm) | Gain de poids du récipient ** (gramme) |
|----------------------------|--|---|
| 1 | 0,15 | 40 |
| 5 | 0,8 | 200 |
| 10 | 1,6 | 400 |
| 15 | 2,4 | 600 |
| 20 | 3,1 | 800 |
| 25 | 3,9 | 1000 |
| 30 | 4,7 | 1200 |
| 35 | 5,5 | 1400 |
| -- | -- | -- |
| -- | -- | -- |
| -- | -- | -- |
| -- | -- | -- |

* eau apportée par les asperseurs ou la pluie

** tests de pesée à faire

ANNEXE 12

Rappel de quelques notions spécifiques à la fertilisation

- Un composé est une substance unique constituée de deux ou plusieurs atomes.
- Un sel est un composé lorsqu'il est en solution donne des ions autres que les ions H⁺ ou le groupement hydroxyl (OH⁻).
- Un ion est constitué d'un seul atome ou un groupe d'atomes ayant une charge électrique positive ou négative.
- Poids moléculaire d'un composé chimique est la somme des poids atomiques de ses différents constituants.

La formule chimique du nitrate de potassium est KNO₃. Il est composé d'un atome de potassium, d'azote et de trois atomes d'oxygène. Le poids atomique est calculé comme suit :

| Symbole chimique | Poids atomique | Nombre d'atomes | Poids |
|-------------------|----------------|-----------------|----------|
| K | 39.102 | 1 | 39.102 |
| N | 14.0067 | 1 | 14.0067 |
| O | 15.9994 | 3 | 47.9982 |
| Poids moléculaire | | | 101.9982 |

Le poids moléculaire d'une mole de KNO₃ est de 102.0 g.

- Molarité : Une solution molaire est préparée en dissolvant une mole de la substance (soluté) dans un solvant en quantité suffisante (l'eau dans notre cas) afin d'avoir un litre de solution. La molarité est donc le nombre de moles d'un composé dissous dans un litre de solution. Elle est exprimée par le suffixe M ou en utilisant le système unitaire SI (mol l⁻¹; kmol m⁻³).

| Quantité | Méthodes alternatives de description | | |
|--|---|---|--|
| | M | SI | SI |
| Une solution de 101.1 g de KNO ₃ dans un litre d'eau contient | 1 M | 1 mol l ⁻¹ | 1 kmol m ⁻³ |
| Une solution contenant 1/1 000 mole par litre contient | 1 mM | 1 mmol l ⁻¹ | 1 mol m ⁻³ |
| Une solution contenant 1/1 000 000 mole par litre contient | 1 μM | 1 μmol l ⁻¹ | 1 mmol m ⁻³ |
| Une solution 1 mM (10 ⁻³) de KNO ₃ contient | 0.1011 g/l 101.1 mg/l | 0.1011 gl ⁻¹ 101.1 mgl ⁻¹ | 101.1 g m ⁻³ 101.1 g m ⁻³ |
| Une solution de 1 μM (10 ⁻⁶) de KNO ₃ contient | 0.1011 mg/l 101.1 μg l ⁻¹ | 0.1011 mgl ⁻¹ 101.1 μgl ⁻¹ | 101.1 mg m ⁻³ 101.1 mg m ⁻³ |

- Molalité : Il s'agit d'une solution (1 mol kg⁻¹) qui est préparée en dissolvant une mole d'une substance dans un kilogramme de solvant. La molalité est indépendante de la température et elle convient mieux pour les calculs thermodynamiques.
- ppm (parts par million) : Dans les programmes de fertilisation, on exprime la majorité des concentrations des éléments nutritifs en ppm. Par exemple (1 ppm = 1 g/1000L; 1 mg/1L; densité de l'eau = 1g/1mL).

ANNEXE 12 (suite)

Rappel de quelques notions spécifiques à la fertilisation

- eq (équivalent) : 1 eq = poids atomique/valence (ou charge ionique). Exemple 1eq de SO_4^{2-} = $96/2 = 48$ (la valeur de 96 représente le poids atomique).

- pH et acidité

| | | | |
|---|-------|-------|-------|
| Injection d'acide dans l'eau d'irrigation | | | |
| Formule : $A \times B \times C = \text{onces d'acide} / 1000 \text{ gallons d'eau permettant d'ajuster le pH à } 6,4$ | | | |
| A est un facteur qui est déterminé en fonction du pH | | | |
| pH | A | pH | A |
| 6,7 | 0,249 | 7,7 | 0,475 |
| 6,9 | 0,342 | 7,9 | 0,484 |
| 7,1 | 0,400 | 8,1 | 0,490 |
| 7,3 | 0,437 | 8,3 | 0,494 |
| 7,5 | 0,460 | 8,5 | 0,496 |
| B est la somme des ions bicarbonates et carbonates exprimée en meq/L | | | |
| C est un facteur déterminé en fonction du type d'acide utilisé | | | |
| Source d'acide | | C | |
| Acide phosphorique (75 %) | | 10,60 | |
| Acide phosphorique (85 %) | | 8,74 | |
| Acide sulfurique (93 %) | | 3,72 | |
| Acide nitrique (61,4 %) | | 15,6 | |
| Exemple : pH = 7,5, carbonates + Bicarbonates = 3,4 meq/L | | | |
| $A \times B \times C = \text{onces d'acide} / 1000 \text{ gallons}$ | | | |
| $0,460 \times 3,4 \times 10,6 = 16,5 \text{ onces d'acide phosphorique} / 1000 \text{ gallons}$ | | | |
| 1 once = 28,35 g | | | |
| 1 gallon = 3,7854 litres | | | |

ANNEXE 13
Exemples de différents calculs d'un programme de fertilisation
à la pépinière de Oued El Bir

.....
Régime de fertilisation proposé

Concentration des macro-éléments (ppm)

| | N-Total | N-NO₃ | N-NH₄ | P | K | Ca | Mg | S-SO₄ |
|--|----------------|-------------------------|-------------------------|-----------|-------------|-----------|------------|-------------------------|
| Objectif | 180 | 130 | 50 | 54 | 90 | 12,5-80 | 15,3-40 | 16 |
| Eau d'irrigation | 37 | 37 | 0 | ND | 4 | 157 | 29 | 341 |
| Quantité à ajouter | 143 | 93 | 50 | 54 | 86 | - | 4,6 | - |
| Nitrate d'ammonium 33% (NH ₄ NO ₃) | 102 | 51 | 51 | | | | | |
| Nitrate de Potasse 13-0-37 | 25 | 25 | | | 72 | | | |
| Acide phosphorique (54%)* Micronite 15 | | | | 24 | | | 4,6 | |
| N-P-K 12-50-12 | 16,5 | 16,5 | | 30 | 13,7 | | | |
| Total | 143,5 | 92,5 | 51 | 54 | 85,7 | - | 4,6 | |
| L'acidité est de 740.3 g/L | | | | | | | | |

ANNEXE 13 (suite)
Régime de fertilisation proposé

.....
Essences concernées: Pin pignon, Pin d'Alep & Cyprés

Concentration des micro-éléments (ppm)

| | Fe | Mn | Zn | Cu | Cl | Mo | B |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|--------------|-------------|
| Objectif | 1,3-4,0 | 0,7-0,8 | 0,05-0,32 | 0,05-0,15 | 0,05-4,0 | 0,013 | 0,36-0,5 |
| Eau d'irrigation | ND | ND | ND | ND | 178 | ND | ND |
| Quantité à ajouter | 3 | 0,7 | 0,30 | 0,12 | - | 0,012 | 0,36 |
| Micronite 15 | 0,92 | 0,69 | 0,92 | 0,12 | - | 0,012 | 0,35 |
| Chélate de fer 6% NaFeEDTA | 2,01 | | | | | | |
| Total | 2,93 | 0,69 | 0,92 | 0,12 | - | 0,012 | 0,35 |
| * Micronite 15: Fe 4%; Zn 4%; Cu 0,5%; Mn 3%; Mg 2%; B 1,5%; Co 0,1%; Mo 0,05%. | | | | | | | |

ANNEXE 13 (suite)
Solutions des différents éléments fertilisants

| Produit | Solution à appliquer | ratio d'injection 1:200 | Quantité pour 50 000 plants | Quantité pour 500 000 plants |
|--|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1- Nitrate d'ammonium 33% (NH ₄ NO ₃) | 309 mg/L | 61,8 g/L | 344g | 3,44 Kg |
| 2- Nitrate de Potasse 13 - 0 - 37 | 195 mg/L | 39 g/L | 217g | 2,17 Kg |
| 3- Acide phosphorique (54%)* | 0,1 mL/L | 20 mL/L | 111,2 mL | 1,112 L |
| 4- N - P- K 12 - 50 -12 | 137,5 mg/L | 27,5 g/L | 153g | 1,53 Kg |
| 5- Micronite 15 | 23 mg/L | 4,6 g/L | 26g | 260g |
| 6- Chélate de fer (6%) | 33,5 mg/L | 6,7 g/L | 37,3g | 373g |
| L'acidité est de 740.3 g/L | | | | |

Quelques remarques:

- Application de 4 mgN/plant.
- En moyenne, il faut 1120 litres d'eau pour fertiliser les 50 000 plants.
- Étant donné le débit de 139,1 L/min, donc la fertilisation de 50 000 plants nécessite 8.06 min, soit pour les 100 000 plants (une section) une durée de 16,12 min.
- Pour avoir les quantités de fertilisants pour les 100 000 plants (une section), il suffit de doubler (x2) les quantités de fertilisants indiquées dans la colonne 4.
- Pour la constitution des solutions stocks, il s'avère nécessaire de constituer les solutions suivantes:
 Solution A: 1 + 2 + 3+ 4,
 Solution B: 5 + 6

ANNEXE 13 (suite)
Estimation prévisionnelle des stocks en éléments fertilisants

| Produit | Quantité pour 500 000 plants | Emballage | Prix unitaire | Stock min - max | Nombre de contenants |
|--|---|------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Nitrate d'ammonium 33% (NH ₄ NO ₃) | 3,44 Kg | - | - | 138 - 172 Kg | |
| Nitrate de Potasse 13 - 0 - 37 | 2,17 Kg | 25 kg | 0,600 | 87 - 108,5 Kg | |
| Acide phosphorique (54%)* | 1,112 L | 36 kg | 0,900 | 45 - 55,6 L 34 - 42 Kg | |
| N - P- K 12 - 50 -12 | 1,53 Kg | 22,5 kg | 1,050 | 62 - 76,5 Kg | |
| Micronite 15 | 260g | 1 kg | 8,000 | 10,4 - 13 Kg | |
| Chélate de fer (6%) | 373g | 1 kg | 13,000 | 15 - 18 Kg | |

ANNEXE 13 (suite)
Régime de fertilisation proposé

| | Unité | Objectif fixé | Eau d'irrigation | Quantité à appliquer |
|-------------------------|---------|---------------|------------------|----------------------|
| Macro-éléments | | | | |
| Azote total | ppm | 180 | 37 | 143 |
| N-NO ₃ | ppm | 90 | 37 | 53 |
| N-NH ₄ | ppm | 90 | 0 | 90 |
| P | ppm | 54 | ND | 54 |
| K | ppm | 90 | 4 | 86 |
| Ca | ppm | 7 (80) | 157 | - |
| Mg | ppm | 9 (40) | 29 | - |
| SO ₄ -S | ppm | 16 | 341 | - |
| Micro-éléments | | | | |
| Fe | ppm | 1,3 | ND | 1,3 |
| Mn | ppm | 0,7 | ND | 0,7 |
| Zn | ppm | 0,05 | ND | 0,05 |
| Cu | ppm | 0,05 | ND | 0,05 |
| Cl | ppm | 0,05 | 178 | 0,05 |
| Mo | ppm | 0,013 | ND | 0,013 |
| B | ppm | 0,36 | ND | 0,36 |
| Qualité de l'eau | | | | |
| pH | - | 5,5 | 7,6 | |
| CE | mmho/cm | 1,2-1,8 | 1,4 | |
| SAR | - | <3 | 1,9 | |
| Résidu sec | (g/L) | - | 1,0 | |