

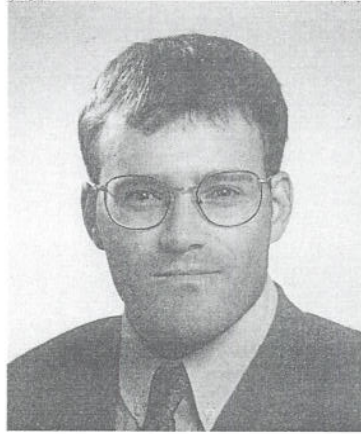
# Étude sur le cernage racinaire de plants produits en récipient

par B.-M. GINGRAS

Ce mémoire contient un errata  
à la page iv du document



Benoit-Marie GINGRAS est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1986. En 1992, ce même établissement lui décernait le titre de maître ès sciences (sciences forestières). À l'emploi du Service de l'amélioration des arbres de la Direction de la recherche forestière depuis 1987, il est chargé de recherches sur la production de semis en récipient.



Depuis de nombreuses années, chacun des Mémoires et des autres rapports publiés par la Recherche forestière est révisé par un comité *ad hoc* d'au moins trois membres recrutés aussi bien à l'intérieur du Ministère que dans le milieu universitaire, la fonction publique du Canada ou les autres milieux de la recherche. Les responsables de la Recherche forestière remercient les scientifiques qui ont accepté bénévolement de revoir le texte présenté ici et de participer ainsi à la diffusion des résultats des recherches menées au ministère des Ressources naturelles.

Les publications de la Recherche forestière sont produites et diffusées à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation de chaque projet ou expérience. En conséquence, ces documents sont, par définition, à *tirage limité* et à *diffusion restreinte*. Adresser toute demande à la :

Direction de la recherche forestière  
Ministère des Ressources naturelles du Québec  
2700, rue Einstein  
SAINTE-FOY (Québec)  
Canada G1P 3W8

**Étude sur le cernage racinaire  
de plants produits en récipient**



**Étude sur le cernage racinaire  
de plants produits en récipient**

par

Benoit-Marie GINGRAS, ing.f., M.Sc.

Mémoire de recherche forestière n° 111

Gouvernement du Québec  
Ministère des Ressources naturelles  
Direction de la recherche forestière  
1994

---

Thèse présentée en mars 1992 à la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval, comme exigence partielle pour l'obtention du grade de maître ès sciences en foresterie, et remaniée pour publication.

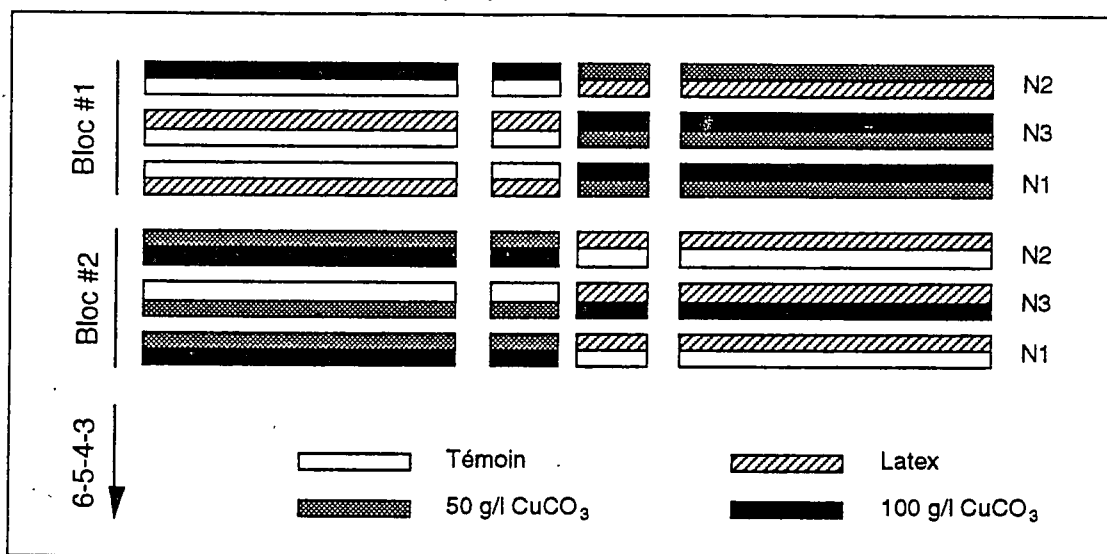
Ce texte est un rapport partiel du projet de recherche n° 03219S :  
*Étude sur le cernage racinaire des plants produits en récipient.*

## ERRATA

page 16, Figure 1.7, ligne 1 : [à gauche] **Non traité** [à droite] **Traité**

pages 11 et 17 : Les dimensions sont celles qu'indique la légende. Les photos ne sont pas aux proportions exactes.

Annexe B, page 53 : remplacer le graphique par celui-ci



ISBN 2-550-29597-8

ISSN 1183-3912

Dépôt légal 1994

Bibliothèque nationale du Québec

Bibliothèque nationale du Canada

© Gouvernement du Québec 1994

## Avant-propos et remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier très sincèrement mon directeur de thèse, le Dr Charles-Gilles Langlois, responsable de la Division de R-D sur les semences, boutures et plants du ministère des Ressources naturelles (secteur Forêts) du Québec, pour sa grande disponibilité et ses précieux conseils tout au long de la réalisation de ce mémoire de recherche. Sa vaste expérience dans le domaine de la production de plants a été l'un des facteurs importants de la réalisation de ce projet. Je tiens également à remercier le Dr Langlois pour tout le soutien matériel mis à ma disposition et surtout pour le professionnalisme et le sens des responsabilités qu'il m'a donné le privilège d'acquiescer.

Je profite de l'occasion pour remercier mon co-directeur, le Dr J.-A. Fortin, de l'Institut de recherche en biologie végétale de Montréal, et le Dr Ronald Girouard, du Centre de foresterie des Laurentides, pour leurs précieux conseils lors de l'élaboration du projet de recherche.

Je tiens à remercier M. Régnald Côté, directeur de la pépinière forestière de Grandes-Piles, pour sa très grande collaboration car le personnel et les installations mis à ma disposition ont permis de mener à terme toutes les expérimentations.

Je ne peux passer sous silence l'excellente collaboration de Mme Diane Sauvageau et de M. Denis Gélinas, techniciens à la pépinière de Grandes-Piles, pour leur professionnalisme et leur dévouement, sans lesquels ces expériences n'auraient pu être réalisées. Je tiens aussi à remercier tout le personnel de cette pépinière pour le grand intérêt qu'ils ont manifesté en tout temps.

Des remerciements sincères sont adressés à M. Claude Fortin du Centre de recherche en biologie forestière de l'Université Laval et à M. Jérôme Mercier de la compagnie Kruger (et anciennement du C.R.B.F.) pour leur grande collaboration.

J'adresse également des remerciements à Mme Lise Charette pour l'aide apportée à l'élaboration des modèles statistiques, de même qu'à tous les membres du personnel du laboratoire de morpho-physiologie du MRN (Forêts), spécialement MM. Richard Gosselin, André Drolet, Etienne Brière et Jean Anglehart, aux aides techniques de l'Université Laval et au personnel du laboratoire d'analyse de la Direction de la recherche forestière du MRN, pour leur grande collaboration à la réalisation des différentes analyses et mesures en laboratoire.



## Résumé

Des plants de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. ont été cultivés pendant deux saisons de croissance dans deux types de récipient traités au cuivre et soumis à trois niveaux de fertilisation azotée. L'objectif visé consistait à produire des semis morphologiquement et physiologiquement équilibrés, exempts de malformations racinaires, pour améliorer l'architecture des racines des plants en récipient destinés au reboisement. Les résultats font ressortir les effets des différents traitements ( $\text{CuCO}_3$  et azote) sur la morphologie et la physiologie des semis d'épinette noire. Ils démontrent la possibilité de produire des plants équilibrés avec un système racinaire horizontal et qui possèdent une capacité de croissance racinaire élevée. Le suivi en plantation permettra, dans le cadre d'une qualification intégrée des plants, de vérifier sur le terrain la performance de ces semis, de prescrire les traitements opérationnels de cernage en pépinière et de recommander éventuellement l'utilisation de cette technique culturale.

Mots-clés : Épinette noire, *Picea mariana*, semis, récipients, fertilisation, cernage, racines.

## Abstract

**A study of the undercutting of container-grown seedlings.** *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. seedlings were grown for two seasons in two types of containers treated with copper and submitted to three levels of nitrogen fertilization. The aim was to produce morphologically and physiologically balanced seedlings, free from root defects, in order to improve the root architecture of container-grown seedlings for reforestation. Results underline the effects of various treatments ( $\text{CuCO}_3$  and nitrogen) on the morphology and physiology of black spruce seedlings. They show the possibility of producing balanced seedlings with a good horizontal root system and a high root growth capacity. The plantation follow-up will help, within an integrated seedling qualification, to verify the performance of these seedlings in the field, to prescribe operational undercutting treatments in the nursery and eventually to recommend the use of this silvicultural technique.

**Key-words :** Black spruce, *Picea mariana*, seedling, container, fertilization, undercutting, root system.



## Table des matières

Avant-propos et remerciements	v
Résumé	vii
<i>Abstract</i>	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xiii
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre premier</b>	
Effets des traitements sur la morphologie des semis	3
Matériel et méthodes	4
Résultats	7
Expérience n° 1. <i>Multipot 45-110</i> + CuCO <sub>3</sub>	7
- Bilan morphologique en 1+0	7
- Bilan morphologique en 2+0	7
- Architecture des systèmes racinaires produits dans le <i>45-110</i> en 2+0	7
- Fertilité du substrat au cours et à la fin de la deuxième saison	9
Expérience n° 2. <i>Trimroot 112</i>	9
- Bilan morphologique en 1+0	9
- Bilan morphologique en 2+0	9
- Architecture des systèmes racinaires produits dans le <i>Trimroot 112</i> en 2+0	9
- Fertilité du substrat au cours et à la fin de la seconde saison	15
Discussion et conclusions	20

## Chapitre II

Effets des traitements sur la physiologie des semis	23
Matériel et méthodes	25
Résultats	27
Expérience n° 1. <i>Multipot 45-110 + CuCO<sub>3</sub></i>	27
- Concentrations des éléments nutritifs, des glucides et de l'amidon dans les tissus à la fin de la première saison de croissance	27
- Concentrations des éléments nutritifs dans les tissus au cours de la seconde saison et à la fin de celle-ci	27
- Concentrations des glucides et de l'amidon dans les tissus au cours de la seconde saison et à la fin de celle-ci	29
- Tests de capacité de croissance racinaire à la fin de la seconde saison	29
Expérience n° 2. <i>Trimroot 112</i>	34
- Concentrations des éléments nutritifs, des glucides et de l'amidon dans les tissus à la fin de la première saison de croissance	34
- Concentrations des éléments nutritifs dans les tissus au cours de la seconde saison et à la fin de celle-ci	34
- Concentrations des glucides et de l'amidon dans les tissus au cours de la seconde saison et à la fin de celle-ci	35
- Tests de capacité de croissance racinaire à la fin de la seconde saison	37
Discussion et conclusions	40
<b>Conclusion générale et perspectives d'avenir</b>	<b>43</b>
Liste des ouvrages cités	45
Annexe A. Calendriers de fertilisation	51
Annexe B. Plan des dispositifs expérimentaux et modèles statistiques	53
Annexe C. Conditions culturales des tests de capacité de croissance racinaire	55

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b>	Bilan morphologique à la fin de la première saison (11 octobre 1989) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient <i>45-110</i>	8
<b>Tableau 1.2</b>	Bilan morphologique à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient <i>45-110</i>	8
<b>Tableau 1.3</b>	Architecture des systèmes racinaires le 30 octobre 1990 en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient <i>45-110</i>	8
<b>Tableau 1.4</b>	Bilan de la fertilité du substrat à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient <i>45-110</i>	14
<b>Tableau 1.5</b>	Bilan morphologique à la fin de la première saison (16 octobre 1989) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	14
<b>Tableau 1.6</b>	Bilan morphologique à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	14
<b>Tableau 1.7</b>	Architecture des systèmes racinaires le 30 octobre 1990 en fonction des six traitements appliqués au récipient <i>Trimroot 112</i>	15
<b>Tableau 1.8</b>	Bilan de la fertilité du substrat à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	15

<b>Tableau 2.1</b>	Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la première saison (11 octobre 1989) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110	26	<b>Tableau 2.10</b>	Bilan des tests de capacité de croissance racinaire du 30 octobre 1990 en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	37
<b>Tableau 2.2</b>	Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la première saison (11 octobre 1989) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110	26			
<b>Tableau 2.3</b>	Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110	26			
<b>Tableau 2.4</b>	Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110	31			
<b>Tableau 2.5</b>	Bilan des tests de capacité de croissance racinaire du 30 octobre 1990 en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110	31			
<b>Tableau 2.6</b>	Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la première saison (16 octobre 1989) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	34			
<b>Tableau 2.7</b>	Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la première saison (16 octobre 1989) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	35			
<b>Tableau 2.8</b>	Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	35			
<b>Tableau 2.9</b>	Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	37			

## Liste des figures

- Figure 1.1** Racines latérales longues inhibées par le cuivre, déviées le long des parois et cernées à l'air libre 6
- Figure 1.2** Les quatre types de systèmes racinaires produits dans le récipient 45-110 à la fin de la deuxième saison de croissance 10
- Figure 1.3** Systèmes racinaires d'un plant témoin (gauche) et d'un plant traité à 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  (droite) produits dans le 45-110 11
- Figure 1.4** Effet du  $\text{CuCO}_3$  sur la morphologie des racines qui entrent en contact avec une paroi traitée 12
- Figure 1.5** Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en cuivre échangeable, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110 13
- Figure 1.6** Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en phosphore assimilable, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110 13
- Figure 1.7** Les deux types de systèmes racinaires produits dans le récipient *Trimroot 112* à la fin de la deuxième saison de croissance 16

<b>Figure 1.8</b>	Systèmes racinaires d'un plant non traité (gauche) et d'un plant traité au cuivre (droite) produits dans le <i>Trimroot 112</i>	17	<b>Figure 2.6</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en amidon dans les tissus des racines, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>45-110</i>	30
<b>Figure 1.9</b>	Effet du cuivre sur la morphologie des racines qui entrent en contact avec une paroi traitée	18	<b>Figure 2.7</b>	Nouvelles racines blanches produites lors des tests de C.C.R. dans le récipient <i>45-110</i> pour les quatre traitements	32-33
<b>Figure 1.10</b>	Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en cuivre échangeable, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>Trimroot 112</i>	19	<b>Figure 2.8</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en azote dans les tissus des tiges en fonction des six traitements appliqués sur le récipient <i>Trimroot 112</i>	36
<b>Figure 1.11</b>	Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en phosphore assimilable, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>Trimroot 112</i>	19	<b>Figure 2.9</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en cuivre dans les tissus des racines, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>Trimroot 112</i>	36
<b>Figure 2.1</b>	Principales étapes de réalisation des tests de capacité de croissance racinaire	24	<b>Figure 2.10</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en phosphore dans les tissus des racines, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>Trimroot 112</i>	36
<b>Figure 2.2</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en azote dans les tissus des tiges en fonction des traitements témoin et 100 g/l appliqués sur le récipient <i>45-110</i>	28	<b>Figure 2.11</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en FGS dans les tissus des tiges, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>Trimroot 112</i>	38
<b>Figure 2.3</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en cuivre dans les tissus des racines, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>45-110</i>	28	<b>Figure 2.12</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en amidon dans les tissus des racines, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>Trimroot 112</i>	38
<b>Figure 2.4</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en phosphore dans les tissus des racines, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>45-110</i>	28	<b>Figure 2.13</b>	Nouvelles racines blanches produites lors des tests de C.C.R. dans le récipient <i>Trimroot 112</i> pour les deux traitements	39
<b>Figure 2.5</b>	Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en FGS dans les tissus des tiges, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient <i>45-110</i>	30			

## Introduction générale

Depuis quelques années, on a observé une instabilité mécanique dans plusieurs plantations du Québec (SHEEDY 1991; communications personnelles, Direction de la recherche forestière et Service de la production de plants du ministère des Ressources naturelles du Québec; Centre forestier des Laurentides du gouvernement du Canada). Cette instabilité mécanique, observée sur des jeunes plants mis en terre, est très rare sur des semis naturellement établis. Les techniques culturales et la mise en terre affectent la morphologie du système racinaire pour plusieurs années, si ce n'est la vie entière de l'arbre (BURDETT 1978). Les semis naturels développent de longues racines latérales près de la surface du sol, qui donnent un excellent support au plant (McDONALD *et al.* 1984b). Les semis cultivés en récipient présentent des malformations racinaires importantes et produisent peu de racines latérales pour assurer un maintien adéquat du plant mis en terre (STEIN 1978). Plus le système racinaire latéral des plants de reboisement est abondant et fibreux, plus grand est le contact avec l'eau et les éléments nutritifs disponibles dans le sol (MEXTAL et BURTON 1978; BURDETT et MARTIN 1982; RUEHLE 1985). Le succès d'une plantation est fonction, principalement, de la capacité du système racinaire à se développer rapidement et adéquatement dès sa mise dans le sol (BURDETT *et al.* 1983). Au Québec en 1989, environ 75 % des plants forestiers mis en terre (environ 185 000 000) sont produits dans le récipient *Multipot 45-110*.

Pour améliorer l'architecture du système racinaire des plants produits en récipient, il est donc nécessaire d'intervenir en cours de culture pour minimiser l'impact des récipients et contribuer à produire des systèmes racinaires semblables à ceux des plants qui s'établissent naturellement. Les malformations racinaires des semis produits en récipient peuvent être éliminées par l'usage de la « chimio-morphose », provoquée entre

autres par le carbonate de cuivre ( $\text{CuCO}_3$ ) (BURDETT 1978, SUTTON et TINUS 1883). Le  $\text{CuCO}_3$ , appliqué sur les parois internes des cavités, permet d'arrêter temporairement la croissance racinaire, stimule la prolifération de nouvelles racines latérales et favorise le développement d'un système racinaire horizontal fibreux (HOCKING 1972, BURDETT 1978, 1982, BURDETT et MARTIN 1982, McDONALD *et al.* 1984a, RUEHLE 1985, ARNOLD et STRUVE 1989a, 1989b). L'inhibition par le cuivre est temporaire; les racines reprennent normalement leur croissance lorsqu'elles ne sont plus soumises à l'effet du  $\text{CuCO}_3$  (BURDETT et MARTIN 1982; McDONALD *et al.* 1984a, 1984b).

L'amélioration de la morphologie du système racinaire ne doit cependant pas se faire au détriment de l'équilibre morpho-physiologique des plants; ces derniers doivent rencontrer les standards et critères de qualification actuellement utilisés au Québec pour la production de plants en récipient. De plus, les semis doivent posséder une très bonne capacité de croissance racinaire afin d'assurer un rendement élevé en plantation.

Le présent mémoire se subdivise en deux chapitres, qui présentent les résultats d'expériences conduites au cours de deux saisons de croissance (1989-1990) avec des semis d'épinette noire cultivés dans deux types de récipient traités au cuivre et soumis à différents niveaux d'azote. Ce mémoire a été réalisé dans le but de préciser les techniques culturales qui permettent la production de plants équilibrés possédant de bonnes racines horizontales et une capacité de croissance racinaire élevée pour être en mesure d'améliorer le rendement des plants mis en terre. L'évaluation du rendement des plants en plantation de qualification (1991-1993), non comprise dans ce mémoire, fera l'objet d'une publication subséquente.

Le premier chapitre traite des effets des traitements au cuivre et des niveaux d'azote sur la **morphologie** des plants et sur l'architecture des différents systèmes racinaires, et de l'impact du cuivre sur la fertilité du substrat. Le deuxième chapitre porte sur la **physiologie** et considère les concentrations en éléments nutritifs, en glucides et en amidon dans les tissus ainsi que la capacité de croissance racinaire en fonction des différents types de plant produits.

## Chapitre premier

### Effets des traitements sur la morphologie des semis

Le présent chapitre traite des effets des traitements au cuivre et des niveaux azotés sur la **morphologie** des semis d'épinette noire cultivés en récipient durant deux saisons de croissance; les effets de ces traitements sur la **physiologie** des semis sont présentés au chapitre suivant. Les résultats exposés dans le présent chapitre portent essentiellement sur la deuxième saison de croissance; en effet, seules les sections intitulées « Bilan morphologique en 1+0 » se rapportent à la première année. Les résultats de la première saison ont fait l'objet d'une communication orale lors d'une Conférence Info-Recherche du MER le 19 avril 1990 et d'un affichage au XIX<sup>e</sup> Congrès mondial de l'*IUFRO* tenu à Montréal du 5 au 11 août 1990.

Les plants produits dans des récipients à parois rigides présentent des malformations racinaires importantes en cours de culture, lacunes qui persistent sur les sites de reboisement; ces lacunes affectent la morphologie du système racinaire pour plusieurs années, si ce n'est la vie entière de l'arbre en plantation (BURDETT 1978). Contrairement aux semis naturels, les semis cultivés en récipient produisent peu de racines latérales aptes à assurer un maintien adéquat du plant mis en terre (STEIN 1978). Cette absence de support latéral entraîne une instabilité mécanique des plants (communications personnelles, Ministère des Forêts du Québec). Pour les semis cultivés en récipient, le développement d'une croissance racinaire horizontale nécessite la pousse de nouvelles elongations sur de vieilles racines près de la surface du sol (MCDONALD *et al.* 1984a, RUEHLE 1985). La capacité qu'a un plant de s'installer en plantation est fonction de la vitesse à laquelle les nouvelles racines émergent de la carotte (BURDETT *et al.* 1983).

Une intervention en cours de culture est donc nécessaire pour améliorer la morphologie du système racinaire avant la mise en terre des plants. Plusieurs études ont démontré l'efficacité du cuivre comme agent inhibiteur de la croissance racinaire (HOCKING 1972, BURDETT 1978, 1982, BURDETT et MARTIN 1982, McDONALD *et al.* 1984a, 1984b, RUEHLE 1985, ARNOLD *et al.* 1989a, 1989b, HUNT 1990). L'usage du carbonate de cuivre ( $\text{CuCO}_3$ ) permet de modifier la morphologie du système racinaire en augmentant son développement latéral : les racines sont inhibées au contact des parois, ce qui permet la prolifération de racines d'ordres supérieurs qui sont à leur tour inhibées (MCDONALD *et al.* 1984b, RUEHLE 1985). Plus le système racinaire est abondant et fibreux, meilleur est le contact avec l'eau et les éléments nutritifs disponibles dans le sol; les semis ainsi traités développent un système racinaire semblable à celui des semis naturellement établis (MEXTAL *et al.* 1978, BURDETT et MARTIN 1982, RUEHLE 1985, BURDETT *et al.* 1986).

Cette inhibition par le cuivre est temporaire et la croissance racinaire reprend normalement une fois que les semis sont extraits des récipients et mis en terre (BURDETT et MARTIN 1982, McDONALD *et al.* 1984a, 1984b, RUEHLE 1985). Selon les essences et les techniques culturales, le cuivre peut affecter la hauteur et les masses des plants (HOCKING 1972, BURDETT 1978, BURDETT et MARTIN 1982, McDONALD *et al.* 1984a, 1984b, ARNOLD et STRUVE 1989a, 1989b). Une régie nutritionnelle bien adaptée est fortement recommandée pour compenser les effets du cuivre sur la croissance des semis. Selon RUEHLE (1985), l'efficacité de la « chimio-morphose » diminue dans le temps en raison de la libération du cuivre vers le substrat de croissance par la peinture utilisée comme agent collant. Très peu d'auteurs ont observé une

toxicité apparente dans les plants. L'emploi du cuivre permet donc de produire des semis qui, une fois mis en terre, développent de longues racines latérales près de la surface du sol; ces plants possèdent alors un ancrage supérieur et une meilleure dispersion du système racinaire (BURDETT 1978, McDONALD *et al.* 1984b, RUEHLE 1985).

L'objectif principal de cette étude était de préciser la concentration de  $\text{CuCO}_3$  et le niveau de fertilisation azotée optimums qui permettront de produire des semis de *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. morphologiquement équilibrés qui possèdent un système racinaire horizontal et qui rencontrent les standards de production du Québec. Cette étude est – du moins à notre connaissance – la première qui porte sur deux saisons complètes de culture et qui s'inscrit dans le cadre d'une production opérationnelle. Depuis le début de la production à grande échelle de plants en récipient au Québec, cette recherche est la première à être consacrée spécifiquement à l'étude des systèmes racinaires. L'utilisation de divers traitements au cuivre et de diverses régies nutritionnelles permettra, une fois les résultats en plantation connus, de prescrire directement, sans autres expérimentations, des recommandations applicables au niveau opérationnel.

\* \* \*

## Matériel et méthodes

Des semis d'épinette noire [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.] ont été cultivés durant deux saisons de croissance dans deux types de récipient : le *Multipot 45-110* et le *Trimroot 112*. Le premier (International Products Limited), fabriqué en polyéthylène, comporte 45 cavités de  $110 \text{ cm}^3$  tandis que le second (Beaver Plastics Limited), fabriqué en polystyrène expansé, compte 112 cavités de  $90 \text{ cm}^3$ .

Quatre traitements ont été retenus pour le *Multipot 45-110* : témoin, latex seul, latex + 50 g/l de  $\text{CuCO}_3$  et latex + 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$ ; la peinture au latex a été choisie comme agent collant pour fixer le cuivre le long des parois des cavités. Les concentrations de cuivre utilisées par plusieurs auteurs se situent entre 0 et 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  et elles sont fonction des essences et du volume des cavités (BURDETT 1978, McDONALD *et al.* 1984a, 1984b, RUEHLE 1985, ARNOLD et STRUVE 1989). Les parois intérieures des cavités ont été entièrement peintes à l'aide d'un pistolet compresseur afin d'y appliquer une couche uniforme de solution cuivrée; on consacra une semaine au séchage et au durcissement de la peinture (communications personnelles,

compagnie SICO inc.). La peinture au latex a dû être diluée avec de l'eau pour qu'on puisse l'utiliser avec d'un pistolet; cette étape complétée, on y a incorporé les 50 ou 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  par litre de latex, et l'eau. La solution (latex +  $\text{CuCO}_3$ ) a été constamment agitée durant la pulvérisation car le cuivre en suspension dans la peinture précipite très rapidement. Des protections individuelles (habits de pluie, gants, bottes, masques avec filtre au charbon,...) assuraient aux peintres une protection adéquate. La peinture employée était du latex blanc extérieur (*Super Latex* fini mat extérieur *SICO-TEX 260-110*) et le carbonate de cuivre provenait de la compagnie Caledon Laboratories Ltd. (*Cupric carbonate basic*, numéro de catalogue 61167).

Le récipient *Trimroot 112* est offert en deux versions : traité au cuivre ou non. La compagnie Beaver Plastics n'a pas voulu révéler la formulation du cuivre (certainement du  $\text{CuCO}_3$ ), son taux de concentration ainsi que la nature de l'agent collant utilisé pour le fixer sur les parois des cavités, en raison d'une demande de brevet pour la série *Trimroot*. Ce récipient offre un traitement au cuivre par coupe différentielle (alternance de trois bandes verticales traitées et de trois, non traitées de même largeur à l'intérieur de la cavité).

Trois niveaux de fertilisation azotée ont été retenus pour tous les traitements, afin de compenser les effets du cuivre sur la morphologie des plants (LANGLOIS, communications personnelles 1989). Les calendriers de fertilisation ont été élaborés en fonction du récipient *Multipot 45-110* et retenus pour les deux types de récipient étant donné leur grande similitude. Les plants produits dans le *45-110* ont reçu, en milligrammes par cavité : N1 = 8,71; N2 = 13,31; N3 = 17,91; P = 10,70 et K = 8,91 en 1+0 et N1 = 32,08; N2 = 42,63; N3 = 53,20; P = 21,25 et K = 31,76 en 2+0. Les équivalents pour le *Trimroot 112* sont : N1 = 7,97; N2 = 12,18; N3 = 16,40; P = 9,78 et K = 8,15 en 1+0 et N1 = 29,35; N2 = 39,00; N3 = 48,67; P = 19,44 et K = 29,05 en 2+0. Les calendriers de fertilisation du *45-110* (Annexe A) ont été élaborés à partir de l'estimation des besoins hebdomadaires de structure et de croissance des plants en azote, phosphore et potassium (LANGLOIS 1983, 1990a, 1990b). Le niveau N2 correspond à l'évaluation exacte; le niveau N1 a été calculé à - 35 % en 1+0 et - 25 % en 2+0 tandis que le niveau N3 a été calculé à + 35 % en 1+0 et + 25 % en 2+0. L'ajout en fertilité du substrat (en ppm ajoutées) est calculé en fonction de la densité de celui-ci : 1 mg ajouté donne 90,9 ppm pour le *45-110* et 111,1 ppm pour le *Trimroot 112*.

Les expériences ont été conduites à la pépinière québécoise de Grandes-Piles au cours des saisons 1989-1990. Les récipients ont été empotés avec un substrat tourbe:vermiculite (3:1) à une densité de 0,1 g/cm<sup>3</sup>, puis ensemencés et placés au sol sur des plateaux de culture les 7 (*Multipot 45-110*) et 8 juin 1989 (*Trimroot 112*). Les deux types de récipient ont constitué deux dispositifs expérimentaux distincts. Les plants ont été cultivés en tunnel en 1+0 et à l'extérieur en 2+0 selon les techniques culturales courantes pour la production en récipient au Québec.

Le dispositif expérimental retenu pour le *Multipot 45-110* était un *split-plot* à deux facteurs (STEEL et TORRIE 1980), la variable **régie nutritionnelle** étant disposée en parcelle principale et la variable **traitement au cuivre** en sous-parcelle. Chaque combinaison (régie nutritionnelle/cuivre) a été répétée six fois et comptait huit récipients par bloc, pour un total de 25 920 semis d'épinette noire. Le dispositif expérimental pour le *Trimroot 112* était également un *split-plot* à deux facteurs avec les mêmes traitements en parcelle principale et sous-parcelle. Chaque combinaison (régie nutritionnelle/cuivre) a été répétée huit fois et comptait cinq récipients par bloc, pour un total de 26 880 semis d'épinette noire. Nous avons retenu ce modèle de dispositif pour simplifier les travaux de fertilisation en pépinière, en raison du regroupement de plusieurs traitements sous une régie nutritionnelle donnée. Nous avons choisi la méthode de l'échantillonnage systématique pour chaque relevé afin de couvrir adéquatement les parcelles à inventorier (COCHRAN 1977). Les plans des dispositifs expérimentaux et les modèles statistiques sont présentés à l'annexe B.

Les fertilisations, sous forme d'engrais solubles commerciaux, ont été appliquées une fois la semaine à l'aide d'un tracteur *Tim's* muni d'un réservoir et d'une rampe. L'irrigation, réalisée à l'aide de jets centraux, était ajustée afin de maintenir un pourcentage d'humidité d'environ 50 % (poids:poids). On a dû appliquer les pesticides suivants : *Benlate* 1 kg/ha, 89-06-16; *EKKO 80W* 4,2 kg/ha, 90-05-04; *Round Up* 3,0 l/ha + *Grammoxone* 1,4 l/ha, 90-07-05; *Round Up* 5,0 l/ha + *Grammoxone* 4,0 l/ha, 90-07-05; *Round Up* 6,0 l/ha, 90-09-09 et *Benlate 50W* 2,8 kg/ha, 90-10-03.

On a mené huit inventaires sur le dispositif *Multipot 45-110* les 89-09-20 et 89-10-11 et les 90-05-08, 90-06-04, 90-07-10, 90-08-15, 90-09-24 et 90-10-24. Dix inventaires furent réalisés sur le dispositif *Trimroot 112* les 89-08-08, 89-08-29, 89-09-20, 89-10-16 et les 90-05-08, 90-06-04, 90-07-10, 90-08-15, 90-09-12, 90-10-09. Chaque inventaire consistait à récolter 72 plants par traitement (12 par bloc pour le 45-110 et

neuf par bloc pour le *Trimroot 112*) pour évaluer les paramètres morphologiques : hauteur, diamètre au collet, masses (tige, racines et totale) et les rapports hauteur/diamètre et masse de la tige/masse des racines. Pour évaluer les masses, on a regroupé les plants par groupe de trois. Les analyses de fertilité du substrat pour l'azote minéral, le phosphore assimilable et le potassium, le cuivre, le calcium, le magnésium et le manganèse sous forme échangeable ont été effectuées à chaque relevé pour certains traitements soumis à la régie nutritionnelle N2 en 1+0 et N1-N2-N3 en 2+0 (témoin et 100 g/l CuCO<sub>3</sub> pour le 45-110 ainsi que traité et non traité pour le *Trimroot 112*). L'inventaire de la fin de chaque saison comportait quant à lui tous les traitements. Les analyses ont été effectuées à partir d'échantillons composites provenant du substrat de 18 plants. Pour diminuer le nombre d'analyses, on a établi les regroupements suivants : blocs 1+1/2 5, 2+1/2 5, 3+1/2 6 et 4+1/2 6 pour le 45-110 et blocs 1+2, 3+4, 5+6 et 7+8 pour le *Trimroot 112*. Ces regroupements ont été effectués afin de permettre le suivi du plus grand nombre possible de traitements et aussi pour tenir compte de la capacité de traitement du laboratoire. Les analyses chimiques ont été menées au laboratoire de la Direction de la recherche du ministère des Forêts du Québec. L'azote minéral a été extrait au chlorure d'ammonium et quantifié sur un colorimètre *Technicon* tandis que les autres éléments ont été extraits selon la méthode à l'acide double (Mehlich n° 3 modifiée) et mesurés sur un spectrophotomètre au plasma. Le pH a été analysé au CaCl<sub>2</sub>. Un inventaire additionnel a été réalisé le 30 octobre 1990 afin d'analyser l'effet des traitements au cuivre sur la morphologie des systèmes racinaires en fin de culture; on préleva 24 plants par traitement. On a retenu la méthode proposée par RUEHLE (1985), qui consiste à dénombrer les racines latérales longues inhibées ou déviées le long des parois et cernées à l'air par le trou de drainage (figure 1.1). La terminologie applicable aux systèmes racinaires est celle proposée par SUTTON et TINUS (1983).

Des analyses statistiques furent réalisées au dernier inventaire de chaque saison ainsi qu'à l'inventaire d'évaluation des systèmes racinaires. Les analyses de variance furent exécutées à l'aide du logiciel SAS selon la procédure *GLM*, et les moyennes différentes furent séparées à l'aide du test de Waller-Duncan (SAS USER'S GUIDE : BASICS 1985, STATISTICS 1985). Les analyses statistiques n'ont pas été effectuées sur les rapports parce que les logiciels statistiques disponibles ne permettaient pas un calcul exact de l'écart-type et par conséquent rendaient biaisée l'analyse de variance. Les regroupements effectués avec les substrats en vue d'obtenir seulement quatre échantillons composites n'ont pas permis des analyses statistiques

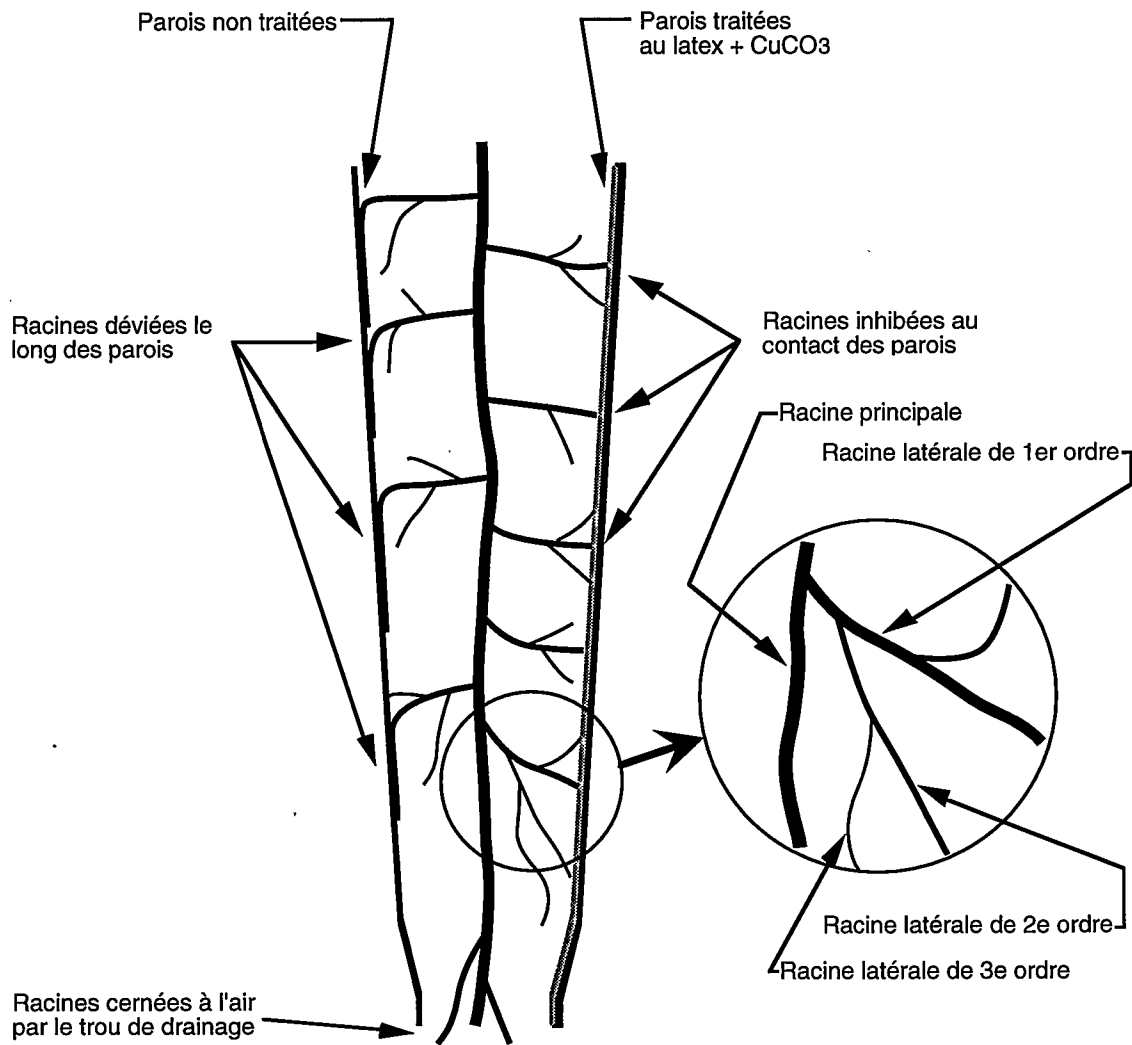


Figure 1.1 Racines latérales longues inhibées par le cuivre, déviées le long des parois et cernées à l'air libre.

rigoureuses avec les substrats; le calcul de la variance n'était pas représentatif du plan d'expérience retenu. En conséquence, les analyses statistiques n'ont pas été effectuées et les intervalles de confiance de la moyenne n'ont pu être incorporés aux graphiques. Les résultats des inventaires en cours de saison ont, quant à eux, servi à établir les profils saisonniers des différents paramètres évalués.

\* \* \*

## Résultats

### Expérience numéro 1 : *Multipot 45-110* + $\text{CuCO}_3$

#### – Bilan morphologique en 1+0

Les plants soumis aux traitements au cuivre de 50 et 100 g/l montraient un gabarit nettement inférieur aux plants témoins (tableau 1.1). Les semis traités au latex seul avaient des masses racinaire et totale et un diamètre au collet inférieurs à ceux des témoins et des masses et une hauteur supérieures à celles des plants traités au  $\text{CuCO}_3$ . Aucune différence n'a été enregistrée entre les deux concentrations de cuivre. Les plants soumis aux régies nutritionnelles N2 et N3 présentaient des dimensions supérieures à celles des plants soumis à la régie N1. Seule la masse de la tige présentait une différence importante entre les régies N2 et N3. L'ensemble des plants produits montrait un équilibre morphologique adéquat (rapport H/D entre 7,4 et 8,6 et T/R entre 2,5 et 3,4). Les semis traités au cuivre présentant le meilleur équilibre étaient ceux qui avaient été soumis à la concentration de 50 g/l et à la régie nutritionnelle N2 (hauteur 9,4 cm, diamètre 1,22 mm, H/D 7,7, masse tige 199 mg, masse racine 63 mg, masse totale 262 mg et T/R = 3,2).

Les plants traités au  $\text{CuCO}_3$  possédaient un système racinaire horizontal avec peu de racines latérales de premier ordre déviées le long des parois de la cavité (100 g/l = 5, 50 g/l = 11, latex = 20 et témoin = 23 pour la régie N2); la plupart étaient cernées au contact des parois cuivrées (100 g/l = 12, 50 g/l = 14, latex = 0 et témoin = 0 pour N2). Le nombre total de racines latérales de premier ordre diminuait en fonction d'une augmentation de la concentration de cuivre. L'impact des régies nutritionnelles sur l'architecture du système racinaire a été négligeable.

#### – Bilan morphologique en 2+0

Les résultats pour les plants soumis à une concentration de 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  ont été, à l'exception du diamètre, nettement inférieurs à ceux des plants

témoins. Les plants traités à 50 g/l avaient une hauteur et des masses (tige et totale) manifestement supérieures à celles des 100 g/l et inférieures à celles des plants témoins (tableau 1.2). À une concentration de 50 g/l, les semis ne présentaient pas d'écarts de croissance notables de la masse des racines par rapport aux témoins. Les semis traités au latex étaient plus petits (hauteur et masses tige et totale) que les témoins. Le diamètre au collet n'était pas affecté par les traitements au cuivre. Plus le niveau azoté augmentait, plus le gabarit des plants augmentait. Seule la masse des racines n'était pas sensiblement différente entre les régies N2 et N3.

En considérant une structure racinaire horizontale adéquate (voir ci-dessous), les plants produits sous une régie nutritionnelle N2 et traités à une concentration de 50 g/l de  $\text{CuCO}_3$  présentaient le meilleur équilibre morphologique : hauteur = 25,4 cm, diamètre = 3,27 mm, H/D = 7,8, masse de la tige = 2563 mg, masse des racines = 955 mg, masse totale = 3518 mg et T/R = 2,7.

#### – Architecture des systèmes racinaires produits dans le *45-110* en 2+0

Les traitements au cuivre ont permis de modifier de façon très importante l'architecture du système racinaire en diminuant considérablement le nombre de racines latérales déviées le long des parois des cavités, créant ainsi une structure horizontale (tableau 1.3). La longueur de la racine principale, le nombre total de racines latérales de premier ordre et le nombre de racines cernées à l'air diminuaient de beaucoup avec une augmentation de la dose de cuivre tandis que le nombre de racines inhibées augmentait. La morphologie du système racinaire n'était aucunement affectée par une augmentation du niveau azoté. Les racines latérales longues de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordre (non dénombrées) présentaient un comportement identique à celui des racines du 1<sup>er</sup> ordre. Les carottes (mottes racinaires) ne montraient pas un maintien adéquat pour les plants soumis au traitement 100 g/l; la densité des racines était cependant très élevée dans la section colonisée de la carotte (6,0 cm sur 12,5 cm) au point que les plants étaient très difficiles à laver. Cette densité était principalement due à l'augmentation du nombre de racines latérales de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordre. Les figures 1.2 et 1.3 présentent une comparaison visuelle des différents systèmes racinaires produits. L'inhibition par le cuivre semble affecter principalement la zone de la coiffe racinaire en laissant intacte la zone méristématique. De nouveaux apex racinaires apparaissent très près de la zone inhibée (figure 1.4).

**Tableau 1.1. Bilan morphologique à la fin de la première saison (11 octobre 1989)  
en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110**

Traitement	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Rapport H/D	Masse tige (mg)	Masse racines (mg)	Masse totale (mg)	Rapport T/R
N1	8,8 b	1,09 b	8,0	167 c	67 b	234 b	2,5
N2	10,2 a	1,28 a	8,0	226 b	76 a	302 a	3,0
N3	10,3 a	1,30 a	8,0	239 a	77 a	316 a	3,1
Témoin	10,7 a	1,33 a	8,1	241 a	96 a	337 a	2,5
Latex	10,5 a	1,22 b	8,6	228 a	80 b	308 b	2,8
50 g/l	9,1 b	1,16 c	7,8	185 b	61 c	245 c	3,0
100 g/l	8,8 b	1,19 bc	7,4	189 b	57 c	246 c	3,4

Verticalement pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

**Tableau 1.2. Bilan morphologique à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990)  
en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110**

Traitement	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Rapport H/D	Masse tige (mg)	Masse racines (mg)	Masse totale (mg)	Rapport T/R
N1	23,8 c	2,83 c	8,4	1964 c	785 b	2749 c	2,5
N2	26,2 b	3,25 b	8,1	2670 b	1039 a	3709 b	2,6
N3	30,5 a	3,49 a	8,7	3263 a	1022 a	4285 a	3,2
Témoin	29,8 a	3,18 a	9,4	2961 a	1006 a	3967 a	2,9
Latex	27,8 b	3,20 a	8,7	2659 b	997 a	3657 b	2,7
50 g/l	25,7 c	3,19 a	8,1	2530 c	915 ab	3445 c	2,8
100 g/l	24,1 d	3,19 a	7,6	2380 d	875 b	3255 d	2,7

Verticalement pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

**Tableau 1.3. Architecture des systèmes racinaires le 30 octobre 1990  
en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110**

Traitement	Longueur de la racine principale (cm)	Racines latérales de premier ordre				
		nombre total	inhibées	déviées α	cernées à l'air α	nombre par cm
N1	9,5 a	46 a	18 a	18 a	7,0 a	4,8
N2	9,6 a	49 a	17 a	19 a	5,0 a	5,1
N3	10,3 a	52 a	18 a	17 a	7,0 a	5,1
Témoin	11,9 a	58 a	0 c	30 a	10 b	4,9
Latex	12,4 a	57 a	16 b	22 a	13 a	4,6
50 g/l	8,9 b	44 b	26 b	14 b	3 c	4,9
100 g/l	6,0 c	37 b	29 a	5 c	0 d	6,2

Moyennes sur 24 plants.

Verticalement pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

α Analyses effectuées sur des données transformées (log10).

– Fertilité du substrat au cours et à la fin de la deuxième saison

Au cours de la seconde saison, la fertilité du substrat en cuivre (Cu) échangeable a augmenté progressivement et elle s'est avérée supérieure aux témoins pour les plants soumis à la concentration de 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  (figure 1.5). La fertilité du substrat en phosphore (P) assimilable (figure 1.6) et en manganèse (Mn) échangeable (tableau 1.4) a été également supérieure avec le traitement 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$ . Le pH montrait une baisse importante d'acidité avec le traitement de 100 g/l ( $3,6^{P/r}$  3,1; moyenne pour N1-N2-N3). Cependant, la concentration en ions échangeables pour le potassium (K), le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) était plus élevée pour les témoins. En début de saison, la concentration en azote (N) minéral était plus haute pour le 100 g/l; cependant, à la fin de la saison les écarts s'étaient complètement dissipés. L'effet des traitements azotés était essentiellement perceptible sur l'azote minéral (N3 N2 et N1). L'azote sous sa forme  $\text{NH}_4$  représentait plus de 80 % de l'azote disponible dans le substrat.

En fin de saison, le bilan de la fertilité dans le substrat (tableau 1.4) fait ressortir que l'effet du  $\text{CuCO}_3$ , à une concentration de 50 g/l, a été environ 50 % moindre sur la fertilité du substrat en Cu, P, K et Mg, le pH et la conductivité que le traitement à 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$ . En fin de saison, les concentrations en azote minéral étaient sensiblement les mêmes pour l'ensemble des traitements.

#### Expérience numéro 2 : *Trimroot 112*

– Bilan morphologique en 1+0

Les plants traités au cuivre présentaient, à un seuil de probabilité de 95 %, un diamètre au collet supérieur ainsi que des masses racinaire et totale inférieures à celles des plants témoins (non traités), la hauteur et la masse de la tige n'étant pas différentes (tableau 1.5). Les plants soumis à la régie N3 montraient, à l'exception de la masse racinaire, un gabarit supérieur à celui des plants produits sous N2 qui, à leur tour, étaient supérieurs en tous points aux plants soumis à la régie N1. L'ensemble des semis produits présentait un très bon équilibre morphologique (rapport H/D entre 8,0 et 8,4 et T/R entre 2,1 et 2,7).

Les plants non traités au cuivre présentaient un système racinaire identique à celui du 45-110 témoin : toutes les racines latérales étaient déviées le long des

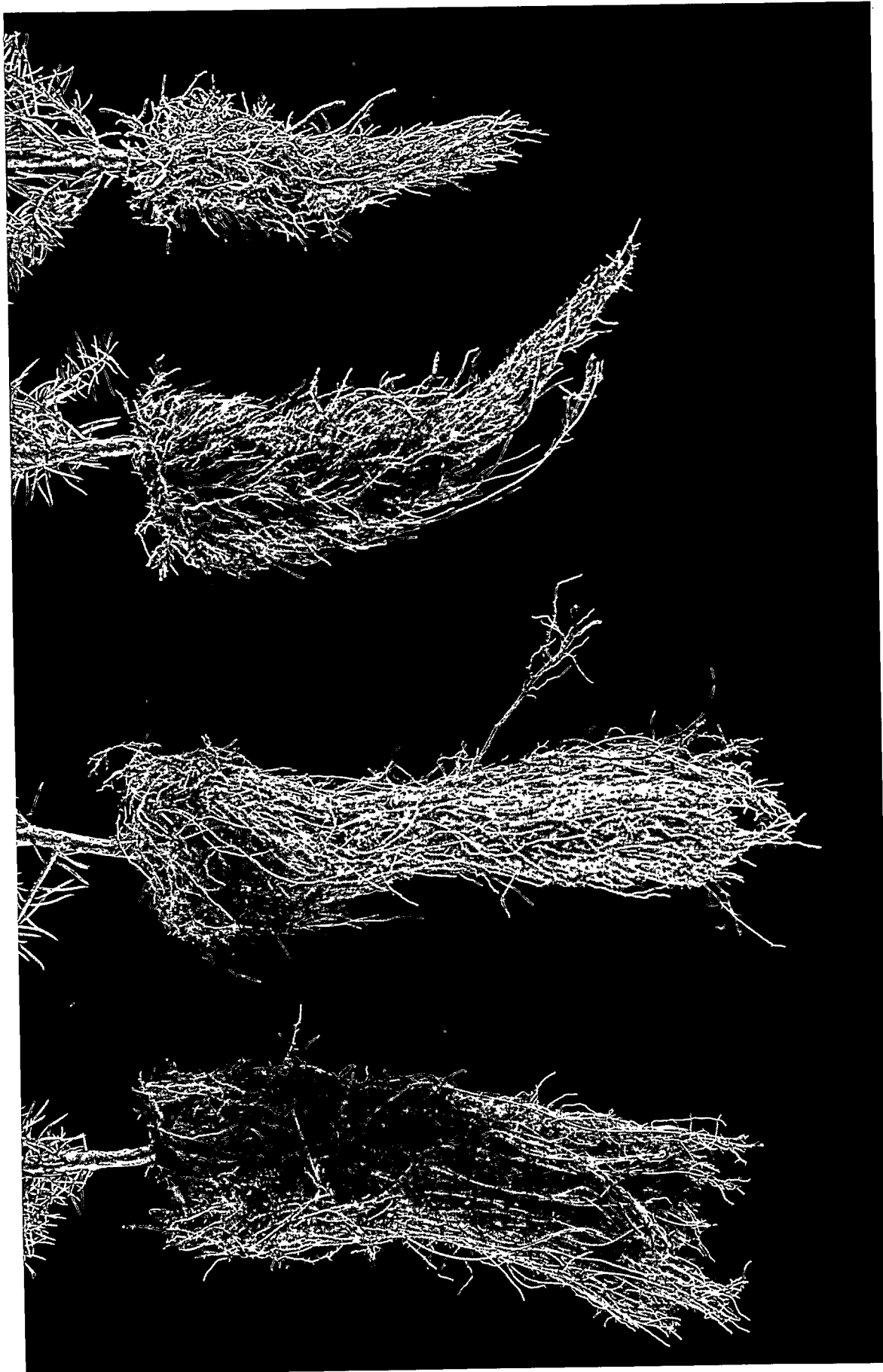
parois vers le bas de la cavité. Les plants traités présentaient une structure racinaire horizontale (racines inhibées au contact des parois cuivrées) et verticale (racines déviées le long des parois non traitées). La solidité de la carotte était plus grande pour les plants traités au cuivre dans le *Trimroot 112* que dans le *Multipot 45-110* (50 et 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$ ).

- Bilan morphologique en 2+0

Les plants produits dans les cavités traitées au cuivre ne présentaient pas de différences notables pour la hauteur, le diamètre au collet et les masses, tant de la tige que totale, par rapport aux plants non traités; seule la masse racinaire était inférieure. Le gabarit des plants s'accroissait en proportion de la fertilisation azotée (tableau 1.6). Seule la masse racinaire ne montrait pas de différence appréciable entre les régies N2 et N3. L'ensemble des plants produits présentait un très bon équilibre morphologique ( $7,0 \leq H/D \leq 7,4$  et  $1,7 \leq T/R \leq 2,1$ ). Compte tenu du volume de la cavité, d'une structure racinaire horizontale et des critères de qualification, les plants produits sous la régie N2 dans les récipients traités présentaient l'équilibre recherché (hauteur = 23,4 cm, diamètre = 3,37 mm, H/D = 6,9, masse de la tige = 2471 mg, masse des racines = 1183 mg, masse totale = 3654 mg et T/R = 2,1).

– Architecture des systèmes racinaires produits dans le *Trimroot 112* en 2+0

Le traitement au cuivre par bandes alternées a permis de produire des systèmes racinaires mixtes : les racines qui étaient mises en contact avec une bande cuivrée étaient inhibées et celles qui touchaient une bande non traitée étaient déviées vers le bas de la cavité (figures 1.7 et 1.8). Les racines latérales de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> ordre ont réagi exactement de la même façon au contact des deux types de paroi. Les différentes doses d'azote n'affectaient aucunement la morphologie du système racinaire (tableau 1.7). La longueur de la racine principale était nettement inférieure pour les plants traités et identique pour les trois niveaux azotés. Les deux traitements engendraient une carotte très ferme même si la longueur de celle des plants traités était un peu plus courte, c'est-à-dire égale à la longueur de la racine principale. Le nombre total de racines latérales de premier ordre n'était pas affecté par les traitements au cuivre; cependant, les plants traités en possédaient un nombre plus élevé par centimètre. L'inhibition par le cuivre semble affecter principalement la zone de la coiffe racinaire en laissant intacte la zone méristématique. L'apparition de nouveaux apex racinaires a été notée très près de la zone inhibée (figure 1.9).



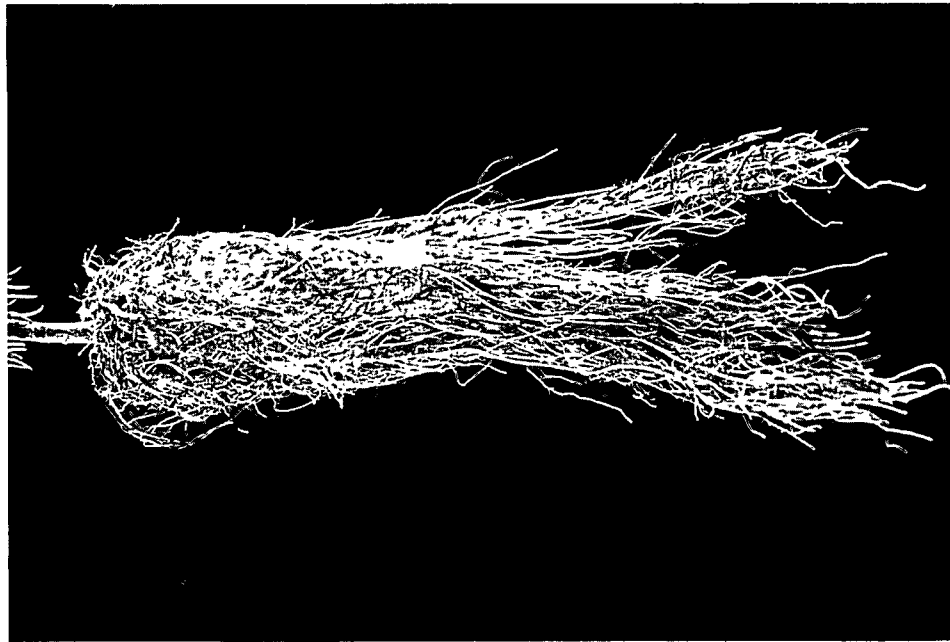
100 g/l CuCO<sub>3</sub>

50 g/l CuCO<sub>3</sub>

Latex

Témoin

Figure 1.2. Les quatre types de système racinaire produits dans le récipient 45-110 à la fin de la deuxième saison de croissance.



Profondeur de la carotte = 12,5 cm



Profondeur de la carotte = 6,0 cm

Figure 1.3. Système racinaire d'un plant témoin (gauche) et d'un plant traité à 100 g/l de CuCO<sub>3</sub> (droite) produits dans le 45-110.

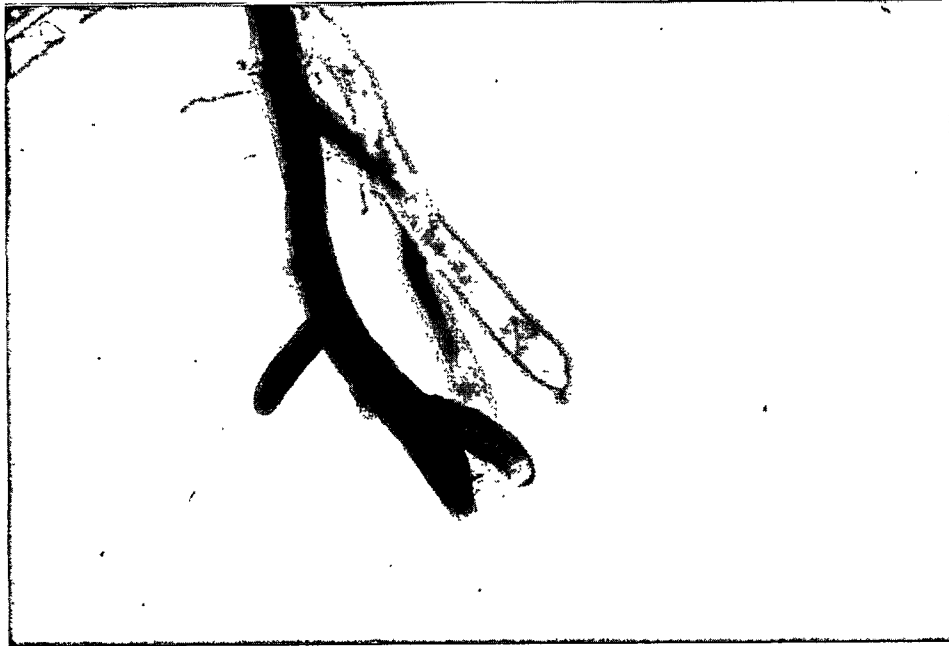


Figure 1.4. Effet du  $\text{CuCO}_3$  sur la morphologie des racines en contact avec une paroi traitée.

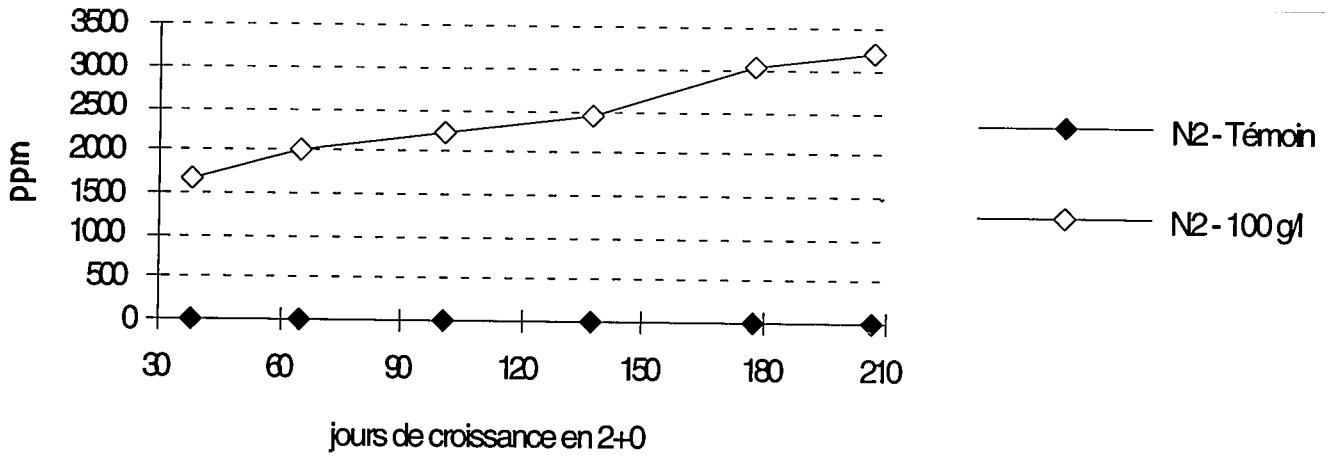


Figure 1.5. Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en cuivre échangeable, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110.

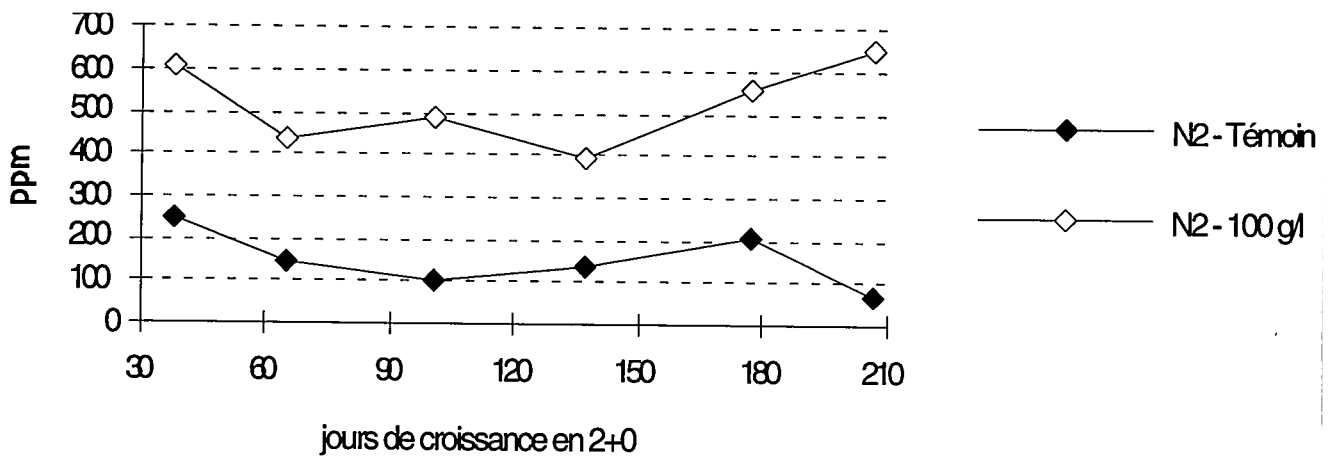


Figure 1.6. Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en phosphore assimilable, pour les plants témoins et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110.

**Tableau 1.4. Bilan de la fertilité du substrat à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990)  
en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110**

	N1				N2				N3			
	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l
N min. (ppm)	9	9	9	11	11	16	16	17	14	11	5	19
P ass. (ppm)	73	73	222	421	67	79	326	650	67	72	297	435
K éch. (ppm)	755	667	623	497	710	730	671	637	847	814	582	362
Cu éch. (ppm)	2	4	892	1919	3	7	1380	3197	3	3	1211	2050
Ca éch. (ppm)	2143	1756	1736	1571	1911	1931	2116	1984	1910	1711	1885	1256
Mg éch. (ppm)	2156	2416	1901	1311	2149	2650	2222	1906	2231	2645	1986	1065
Mn éch. (ppm)	7	21	28	25	5	23	35	36	5	16	29	20
pH	3,1	3,5	3,5	3,7	3,1	3,4	3,5	3,7	3,2	3,4	3,4	3,5
Cond. (s)	597	461	397	281	533	550	419	341	590	492	364	262

**Tableau 1.5. Bilan morphologique à la fin de la première saison (16 octobre 1989)  
en fonction des six traitements appliqués sur le récipient *Trimroot 112***

Traitement	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Rapport H/D	Masse tige (mg) α	Masse racines (mg) α	Masse totale (mg) α	Rapport T/R
N1	8,8 c	1,07 c	8,2	162 c	75 b	237 c	2,2
N2	10,0 b	1,23 b	8,1	216 b	92 a	308 b	2,4
N3	10,8 a	1,31 a	8,2	247 a	97 a	344 a	2,6
Non traité	9,8 a	1,18 b	8,4	205 a	98 a	303 a	2,1
Traité	9,9 a	1,24 a	8,0	212 a	78 b	290 b	2,7

Verticalement pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

α Analyses effectuées sur les données transformées (log10).

**Tableau 1.6. Bilan morphologique à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990)  
en fonction des six traitements appliqués sur le récipient *Trimroot 112***

Traitement	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Rapport H/D	Masse tige (mg)	Masse racines (mg)	Masse totale (mg)	Rapport T/R
N1	20,1 c	2,81 c	7,1	1654 c	988 b	2642 c	1,7
N2	23,2 b	3,24 b	7,1	2327 b	1330 a	3658 b	1,7
N3	25,6 a	3,49 a	7,3	2719 a	1367 a	4086 a	2,0
Non traité	23,2 a	3,14 a	7,4	2181 a	1361 a	3542 a	1,6
Traité	22,7 a	3,23 a	7,0	2287 a	1094 b	3381 a	2,1

Verticalement pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

**Tableau 1.7. Architecture des systèmes racinaires le 30 octobre 1990  
en fonction des six traitements appliqués au réceptif *Trimroot 112***

Traitement	Longueur de la racine principale (cm)	Nombre de racines latérales de premier ordre	Nombre de racines latérales par centimètre
N1	12,3 a	64 a	5,2
N2	12,1 a	57 a	4,7
N3	12,3 a	62 a	5,0
Non traité	14,0 a	63 a	4,5
Traité	10,4 b	59 a	5,7

Moyennes sur 24 plants.

Verticalement pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

**Tableau 1.8. Bilan de la fertilité du substrat à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990)  
en fonction des six traitements appliqués sur le réceptif *Trimroot 112***

	N1		N2		N3	
	Non traité	Traité	Non traité	Traité	Non traité	Traité
N min. (ppm)	11	11	14	14	20	19
P ass. (ppm)	92	358	122	377	135	425
K éch. (ppm)	897	867	906	896	920	960
Cu éch. (ppm)	7	1719	11	1683	6	1935
Ca éch. (ppm)	1849	1773	1705	1723	1708	1937
Mg éch. (ppm)	2179	2020	2209	1905	2186	2024
Mn éch. (ppm)	7	16	5	13	5	14
pH	3,2	3,3	3,2	3,3	3,2	3,2
Cond. (s)	654	608	767	741	776	765

– Fertilité du substrat au cours  
et à la fin de la seconde saison

La fertilité du substrat en cuivre (Cu) échangeable a augmenté tout au long de la saison et s'est révélée supérieure à celle des plants non traités (figure 1.10). La fertilité en phosphore (P) assimilable (figure 1.11) était également supérieure chez les plants traités au cuivre. Le manganèse (Mn) présentait en fin de saison une concentration en ions échangeables plus élevée pour les plants traités (tableau 1.8). La concentration en magnésium (Mg) échangeable dans le substrat était supérieure pour les plants non traités au cuivre.

Les profils saisonniers de l'azote (N) minéral, du potassium (K) et du calcium (Ca) échangeables, du pH et de la conductivité étaient semblables pour les deux traitements. La fertilité du substrat était très peu affectée par les différentes régies nutritionnelles à l'exception du phosphore assimilable en fin de saison (P sous N3 N2 N1). Durant la saison, on ne percevait que très peu de différence entre les trois niveaux azotés en ce qui a trait à la fertilité en azote minéral. L'azote, sous sa forme ammoniacale, représentait plus de 80 % de l'azote disponible dans le sol. Le tableau 1.8 présente le bilan de fin de saison.



Non traité

Traité

Figure 1.7. Les deux types de système racinaire produits dans le récipient *Trimroot 112* à la fin de la deuxième saison de croissance.



Profondeur de la carotte = 14,0 cm



Profondeur de la carotte = 10,4 cm

Figure 1.8. Système racinaire d'un plant non traité (gauche) et d'un plant traité au cuivre (droite) produits dans le *Trimroot* 112.

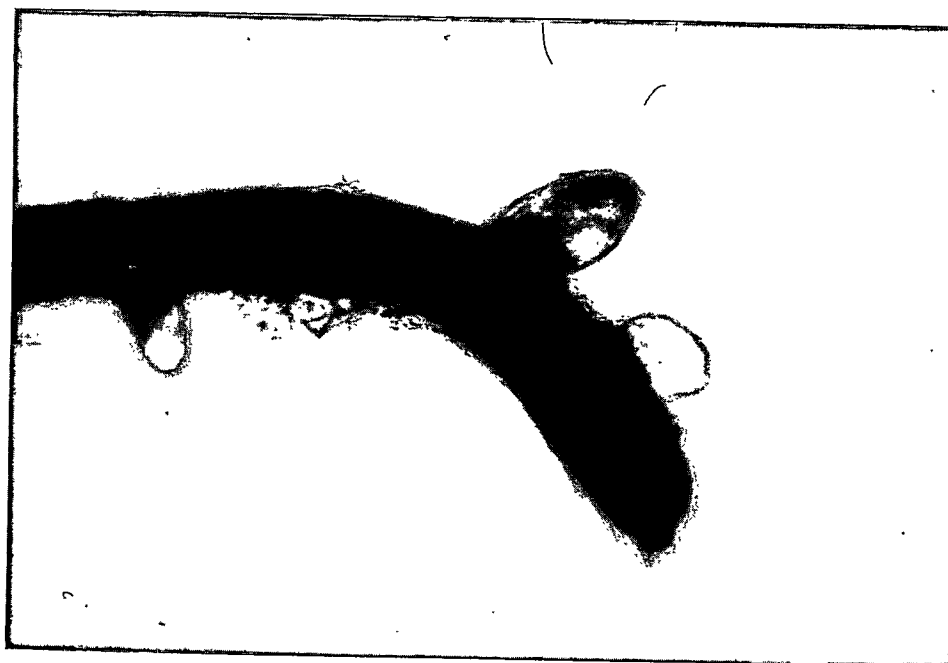
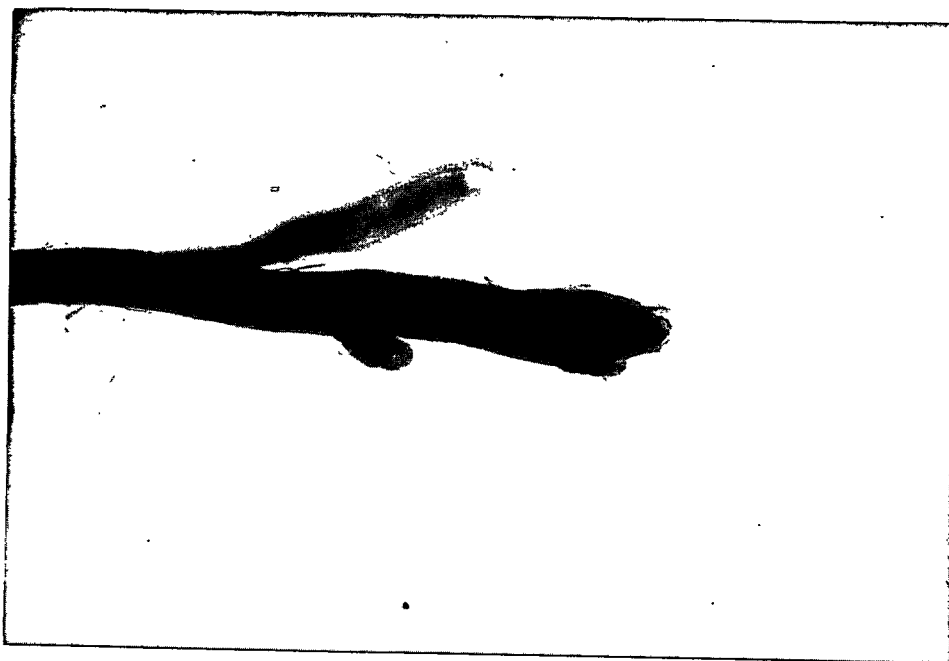


Figure 1.9. Effet du cuivre sur la morphologie des racines qui entrent en contact avec une paroi traitée.

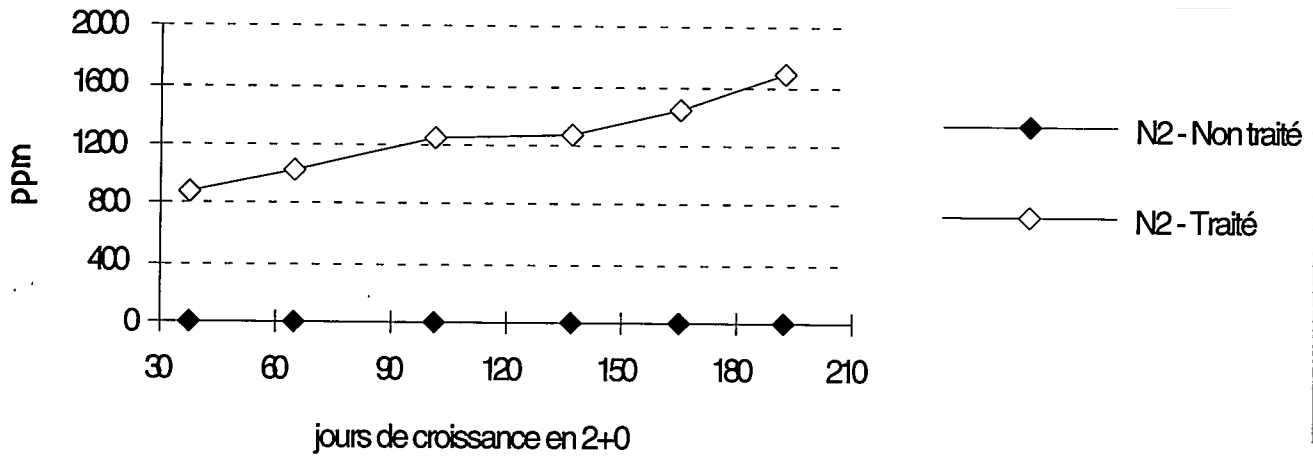


Figure 1.10. Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en cuivre échangeable, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient *Trimroot 112*.

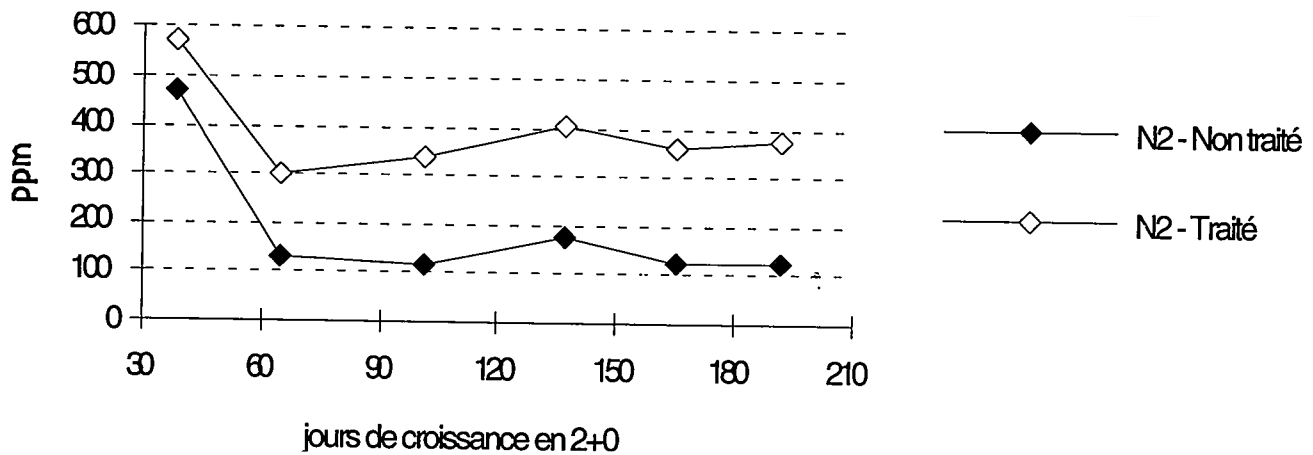


Figure 1.11. Progression, au cours de la deuxième saison, de la fertilité du substrat en phosphore assimilable, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient *Trimroot 112*.

## Discussion et conclusions

Les expériences entreprises à la pépinière de Grandes-Piles en 1989-1990 ont permis de produire des plants d'épinette noire [*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.] morphologiquement équilibrés qui possèdent une structure racinaire horizontale exempte de malformation, de même qu'elles ont établi les conditions culturales pour les obtenir. La forme du système racinaire au moment de la mise en terre est un facteur clef du succès de la reprise. En effet, la carotte racinaire perd environ 85 % de son eau vers le sol environnant dans les premières heures qui suivent sa mise en terre; cette eau doit donc être remplacée rapidement avant que des dommages permanents n'apparaissent sur les semis (GILMAN 1990b). La capacité qu'a un plant de s'installer en plantation est fonction de la rapidité avec laquelle de nouvelles racines émergent de la carotte (BURDETT *et al.* 1983). Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire ont, pour une première fois, porté sur deux saisons de croissance, les autres études citées n'ayant fait l'objet que d'une seule saison de suivi.

Les calendriers de fertilisation, élaborés selon une méthodologie basée sur l'évaluation des besoins hebdomadaires de structure et de croissance proposée par LANGLOIS (1983, 1990a, 1990b), étaient très bien adaptés aux deux types de récipient pour les deux saisons de croissance. La grande similitude entre les récipients utilisés a permis d'appliquer, sur les deux types, les fertilisations évaluées pour le *Multipot 45-110*. Les plants produits dans le *Trimroot 112* n'ont reçu que 91,5 % (mg/cavité) du fertilisant dispensé au *45-110*; cette diminution était souhaitable, si l'on considère le plus faible volume des cavités (90 cc par rapport à 110 cc). Au cours des deux saisons, les fertilisations ont été arrêtées de 3 à 4 semaines afin de ne pas nuire au processus d'aoûtement des plants (Annexe A). Ces arrêts, non prévus initialement, ont été nécessaires en raison de la non-disponibilité des résultats d'analyses de substrat en cours de saison.

Les résultats obtenus en 1+0 (tableaux 1.1 et 1.5) permettaient déjà de préciser les effets du cuivre et des régies nutritionnelles sur la morphologie des semis en fin de culture. En plus de modifier l'architecture des systèmes racinaires, les traitements au  $\text{CuCO}_3$  affectent de façon significative le gabarit des plants. Les pertes de croissance dues au cuivre étaient compensées par l'utilisation d'une fertilisation azotée plus importante. Cette combinaison cuivre-azote a permis de produire la première année des semis équilibrés (N2 & 50 g/l pour le *45-110* et N2 + traité pour le *Trimroot 112*), conformes aux objectifs de production en 1+0, avec des systèmes racinaires horizontaux.

Les racines qui rencontraient une paroi cuivrée étaient aussitôt inhibées et donnaient naissance à des racines d'ordre supérieur qui étaient à leur tour inhibées. Les systèmes racinaires produits étaient beaucoup plus abondants et fibreux que ceux des plants non traités au cuivre et ils avaient l'apparence d'une « brosse à éprouvette ».

À la deuxième saison de croissance, les traitements de 50 et 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  ont limité de façon considérable la croissance des plants (tableau 1.2). Seul le diamètre au collet n'a pas été affecté, en raison de la dimension restrictive de la cavité ou de la densité de culture. L'usage des régies N2 et N3 a permis de produire des plants plus gros malgré les pertes de croissance imputables au cuivre. Le traitement au cuivre utilisé dans le *Trimroot 112* (tableau 1,6) a eu beaucoup moins d'impact sur la morphologie des semis; seule la masse racinaire s'est révélée inférieure. En ce cas-ci, l'effet des fertilisations azotées était le même que pour le *45-110*. L'usage de plusieurs régies nutritionnelles et traitements au cuivre (*45-110*) a permis de préciser quelle sera la nutrition minérale et la concentration de cuivre optimums sur deux saisons de croissance pour les deux types de production : 50 g/l et, en mg/cavité, N = 55,94, P = 31,95 et K = 40,67 pour le *45-110* (Annexe A) et traité + N2 = 51,18, P = 29,22 et K = 37,20 pour le *Trimroot 112*. Les plants produits dans le *Trimroot 112* étaient plus petits que dans le *45-110*. Les semis cultivés dans ces conditions rencontraient de façon très satisfaisante les standards de production actuellement en vigueur au Québec. L'effet du cuivre sur la morphologie a déjà été mis en évidence par HOCKING (1972), BURDETT (1978), BURDETT et MARTIN (1982), McDONALD *et al.* (1984a, 1984b), RUEHLE (1985), ARNOLD *et al.* (1989a, 1989b) et HUNT (1990). Cependant, aucune de ces études ne portait sur l'épinette noire et ne comportait l'usage de plusieurs régies nutritionnelles.

Le cuivre a permis de modifier de façon très substantielle l'architecture du système racinaire en créant à l'intérieur de la cavité une structure horizontale. Le cuivre est resté efficace jusqu'à la fin de la deuxième saison de croissance. Le système racinaire ainsi produit était très abondant et fibreux. Les mêmes constatations ont été faites par HOCKING (1972), BURDETT (1978), BURDETT et MARTIN (1982), McDONALD *et al.* (1984a, 1984b), RUEHLE (1985) et ARNOLD et STRUVE (1989a, 1989b). À une concentration de 100 g/l, le cuivre n'est pas recommandé en raison des effets trop importants qu'il exerce sur la morphologie du système racinaire et celle du plant en général. À une concentration de 50 g/l, la morphologie racinaire est à son meilleur (figures 1.2 et 1.3) et la carotte est généralement assez résistante pour affronter les manipulations

du reboisement. Le système de traitement par bandes utilisé dans le *Trimroot 112* a permis de produire un système racinaire muni de composantes verticales et horizontales (figure 1.7 et 1.8). La structure horizontale provient des racines inhibées au contact des parois cuivrées tandis que la verticale provient des racines déviées vers le bas de la carotte le long des parois non traitées. Ce type de structure racinaire assure un excellent maintien à la carotte, maintien nettement supérieur à celui obtenu dans le *45-110* avec une concentration de 50 g/l de  $\text{CuCO}_3$ . Ce type de traitement par bandes devrait être utilisé pour tous les essais éventuels qui pourraient être entrepris avec le cuivre. Un doute persiste, cependant, quant à la durée des effets de l'inhibition. Les plants sont restés en contact deux années avec le  $\text{CuCO}_3$  comparativement à une seule pour tous les travaux cités plus haut. La reprise de la croissance racinaire doit se faire à partir d'apex situés près de la zone inhibée plutôt que par une elongation de la racine inhibée elle-même. Des coupes anatomiques et des tests de viabilité au tétrazolium auraient permis de préciser l'importance de la zone réellement affectée par le cuivre.

Les plants possédant un système racinaire horizontal, prêt à reprendre sa croissance normale lorsqu'il n'est plus soumis au cuivre (inhibition temporaire), devraient posséder tous les atouts voulus pour une implantation rapide et adéquate, avec un développement racinaire semblable à celui des semis naturellement établis. Les arbres développent des racines latérales croissant horizontalement près de la surface du sol, généralement dans les 30 premiers centimètres. Ces longues racines latérales portent les racines courtes, responsables de la plus grande partie de l'absorption en eau et en éléments nutritifs dans les 20 premiers centimètres de sol (GILMAN 1990a). Selon cet auteur, la morphologie des systèmes racinaires peut influencer la survie, la stabilité et la croissance des semis. Ces nombreuses ramifications permettent au plant d'accroître sa surface d'absorption en exploitant un plus grand volume de sol (LANGLOIS 1980). D'après GILMAN (1990b), d'une à dix années en plantation sont nécessaires pour remplacer le système racinaire d'un plant mis en terre. Le nombre et la distribution tous azimuts des grosses racines latérales sont importants pour la stabilité de l'arbre (COUTTS et LEWIS 1983).

La fertilité du substrat en cuivre échangeable (100 g/l et traité) a augmenté de façon très importante en 2+0 : de 1655 à 3197 ppm pour le *45-110* (figure 1.5) et de 873 à 1683 ppm pour le *Trimroot 112* (figure 1.10). Le cuivre est donc relâché par la peinture vers le substrat; cette perte le long des parois des

cavités a déjà été mise en évidence par RUEHLE (1985). Ceci laisse fortement supposer que les traitements au  $\text{CuCO}_3$  ne seraient plus efficaces pour une autre rotation de culture (2 années). Les suivis en 2+0 ont permis de faire ressortir une interaction importante entre le cuivre (Cu) disponible et le phosphore (P) assimilable. En effet, les plants traités au carbonate de cuivre présentaient une fertilité du substrat en P nettement plus élevée que les plants non traités (figures 1.6 et 1.11). Cette très grande différence en fertilité du substrat laisse supposer que les plants soumis aux traitements au cuivre ont absorbé beaucoup de cuivre et peu de phosphore. Les travaux de SAUR (1990a, 1990b, 1990c) font également état de l'interaction entre ces deux éléments. Selon cet auteur (1990c), l'interaction entre le phosphore et le cuivre est la résultante de nombreux mécanismes où interviennent le sol, les micro-organismes du sol et le végétal. Les variations en fertilité du substrat observées pour K, Ca, Mg et Mn, bien que moins importantes, laissent également supposer des différences dans l'absorption de ces éléments par la plante pour les divers traitements. L'incidence des traitements au cuivre sur la fertilité du substrat est beaucoup moins importante pour une concentration de 50 g/l de  $\text{CuCO}_3$  ainsi que pour le *Trimroot 112* traité (tableaux 1.4 et 1.8). La concentration de 50 g/l est recommandée par plusieurs auteurs (RUEHLE 1985; McDONALD *et al.* 1984a, 1984b). Tout l'azote dispensé aux plants a servi à leur croissance; ceci explique les valeurs quasi identiques de fertilité du substrat en N minéral (ppm) entre les différentes régies azotées en fin de saison.

Les regroupements de blocs, effectués pour les analyses de la fertilité du substrat, n'ont eu d'incidence négative que sur la capacité d'effectuer des analyses statistiques rigoureuses, et sur la capacité d'ajouter aux graphiques les intervalles de confiance de la moyenne. Les résultats des analyses ont quand même permis de faire ressortir, de façon très nette, les effets des traitements sur la fertilité du substrat en éléments nutritifs. Cependant, si cette expérience était reprise, trois solutions devraient alors être envisagées pour corriger ces lacunes : considérer tous les blocs (si possible), sélectionner au hasard seulement quatre blocs pour les analyses, ou bâtir un dispositif qui compte quatre blocs. La solution idéale consiste à bâtir un dispositif expérimental qui comporte un nombre de blocs identique à celui du nombre d'analyses pouvant être réalisées pour un traitement. Il est toujours souhaitable d'avoir un nombre égal de répétitions (blocs) pour l'ensemble des paramètres évalués, principalement pour les analyses de corrélation et de régression.

Les interactions régies nutritionnelles/traitement n'ont pas été incorporées aux tableaux 1.1 et 1.2 en raison, dans le cas présent, de leur faible importance dans l'interprétation des résultats. Cinq interactions ont été observées pour le 45-110 : les masses (tige, racines et totale) en 1+0 et les masses de la tige et des racines en 2+0. Ces interactions proviennent d'un non-parallélisme entre le comportement des trois régies nutritionnelles pour l'ensemble des traitements. Le cas de la masse de la tige en 2+0 illustre bien ce phénomène : on observe une forte décroissance entre le témoin et le 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  pour les régies N2 et N3 tandis qu'il y a très peu de différence pour la régie N1. Aucune autre interaction n'a été observée pour l'ensemble des analyses effectuées dans ce chapitre.

Cette étude aura donc permis de démontrer qu'il est possible de produire des plants possédant une structure racinaire semblable à celle des semis naturellement établis. Cette étude, comme toutes celles citées dans cet ouvrage, aura également permis de mettre en évidence l'importance du système racinaire pour les plants produits en récipient. Selon SUTTON et TINUS (1983), les principales fonctions des racines sont les suivantes : ancrage au sol, absorption de l'eau et des éléments nutritifs, production des acides aminés, lipides et autres substances organiques, excrétion de différentes substances, approvisionnement des feuilles en eau et en éléments nutritifs, accumulation des produits de la photosynthèse, régulation du processus d'oxydo-réduction dans les feuilles, interactions avec des champignons mycorhizateurs et entreposage des éléments nutritifs.

Même si l'objectif principal de cette étude a été atteint, c'est-à-dire préciser la concentration de  $\text{CuCO}_3$  et le niveau de fertilisation azotée optimums pour la production de semis morphologiquement équilibrés exempts de malformation racinaire, plusieurs autres aspects doivent être considérés. L'effet des traitements sur la physiologie des plants, la capacité de croissance racinaire et le rendement en plantation doivent d'abord être connus avant de statuer sur l'efficacité réelle des traitements au cuivre. Les deux premiers points font l'objet du deuxième chapitre de ce mémoire, tandis que le comportement en plantation sera évalué à l'automne de 1991, 1992 et 1993, les plants ayant été mis en terre au printemps 1991.

L'efficacité du  $\text{CuCO}_3$  comme agent régulateur de la croissance racinaire a été démontré dans cette étude et plusieurs autres. Cependant, le cuivre comporte ses inconvénients : coût très élevé du produit, toxicité très grande, traitement à refaire à chaque rotation de culture, effets nocifs sur la santé des personnes qui manipulent le produit et problèmes environnementaux. C'est pourquoi le rendement de ces plants traités au cuivre en plantation devra être réellement supérieur pour contrecarrer les inconvénients et les coûts additionnels de production.

Si les problèmes de stabilité et de reprise en plantation persistaient, des études devraient être entreprises afin de trouver un substitut au cuivre. Les travaux avec l'éthylène ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), régulateur hormonal de croissance, comme ceux qu'ont entrepris LIVINGSTON et MAYNARD (1988), pourraient être une avenue à privilégier. Le développement de récipients à parois ajourées comme le *Plantek 63F* de la compagnie Lannen pourrait permettre la production de systèmes racinaires horizontaux de façon naturelle. Dans ce type de récipient, les racines sont inhibées à l'air libre par de petites fentes verticales pratiquées dans les parois de chaque cavité. Des résultats obtenus par LANGLOIS et GINGRAS (1990, non publiés) dans des récipients à parois ajourées laissent entrevoir un excellent avenir pour ce type de culture.

## Chapitre II

### Effets des traitements sur la physiologie des semis

Ce deuxième chapitre traite des effets des traitements au cuivre et des niveaux azotés sur la **physiologie** des semis d'épinette noire cultivés en récipient durant deux saisons de croissance. Les résultats exposés ici portent principalement sur la deuxième saison de croissance; seules les sections intitulées « Concentrations des éléments nutritifs, des glucides et de l'amidon dans les tissus à la fin de la première saison de croissance » se rapportent à la première année. Les résultats de la première saison ont fait l'objet d'une présentation orale lors d'une conférence Info-Recherche de la Direction de la recherche du MER le 19 avril 1990 et d'un affichage au XIX<sup>e</sup> Congrès mondial de l'*IUFRO* tenu à Montréal du 5 au 11 août 1990.

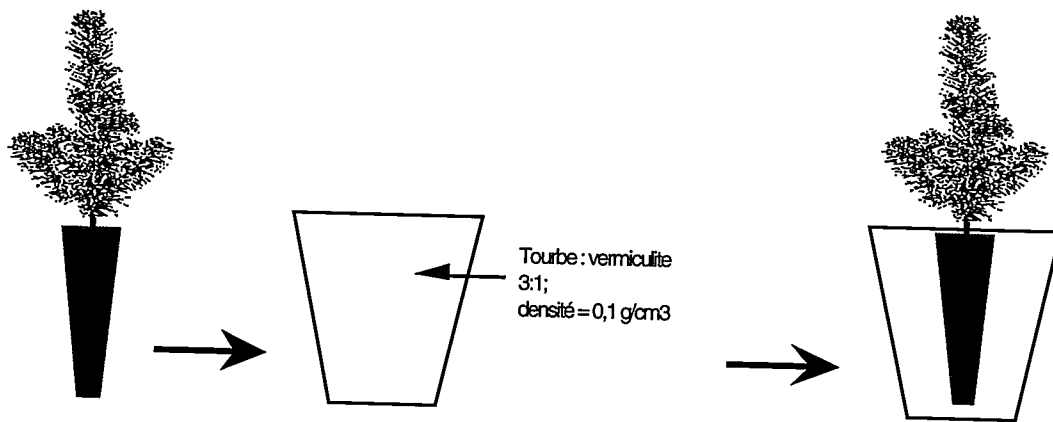
Depuis quelques années, on observe une instabilité mécanique dans des plantations issues de semis produits en récipient. La qualité et la rapidité du développement racinaire, facteurs clefs du succès d'une plantation, dépendent des caractéristiques morphologiques et physiologiques des plants mis en terre (BURDETT 1983). Les malformations racinaires, inhérentes à la production de plants dans des récipients à parois rigides, sont considérées comme étant la cause première du mauvais développement des racines en plantation, ce qui entraîne l'instabilité des plants. C'est pourquoi une intervention en cours de culture est essentielle afin de produire des plants qui possèdent une structure racinaire horizontale et fibreuse. Plus le système racinaire est abondant et fibreux, meilleur est le contact avec l'eau et les éléments nutritifs disponibles dans le sol (MEXTAL et BURTON 1978, BURDETT et MARTIN 1982, RUEHLE 1985).

Plusieurs auteurs (HOCKING 1972, BURDETT 1978, 1982, BURDETT et MARTIN 1982, McDONALD *et al.* 1984a, 1984b, RUEHLE 1985, ARNOLD et STRUVE 1989a, 1989b, HUNT 1990) ont démontré l'efficacité du cuivre comme agent inhibiteur de la croissance racinaire. Le  $\text{CuCO}_3$  permet de produire des systèmes racinaires horizontaux, abondants et fibreux (McDONALD *et al.* 1984b, RUEHLE 1985). L'inhibition causée par le cuivre est temporaire et la croissance des racines reprend normalement lorsque celles-ci ne sont plus soumises à son effet (BURDETT et MARTIN 1982, McDONALD *et al.* 1984A, 1984B, RUEHLE 1985). Les semis ainsi produits possèdent un développement racinaire semblable à celui des semis naturellement établis (MEXTAL et BURTON 1978, BURDETT et MARTIN 1982, RUEHLE 1985, BURDETT *et al.* 1986).

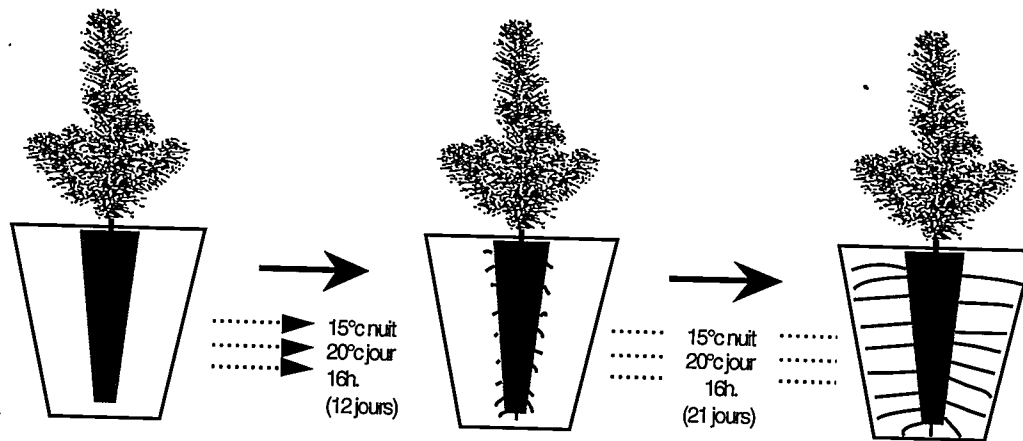
Une modification de l'architecture du système racinaire ne doit cependant pas se faire au détriment de l'équilibre physiologique des plants et de leur capacité de croissance racinaire. L'utilisation de régies azotées plus riches, destinées à compenser les pertes de croissance dues au cuivre, peut occasionner une diminution de la résistance des plants aux gels hâtifs et tardifs. Selon LOESCHER (1990), la survie des plants en hiver et le rendement de l'année suivante dépendent des réserves en hydrates de carbone (glucides et amidon) et leur accumulation est très sensible aux techniques culturales.

Ces deux exemples font ressortir l'importance qu'il faut accorder à l'aspect physiologique au moment d'évaluer l'effet de différents traitements culturaux, principalement lorsqu'on envisage une modification

### A- Empotage des plants et mise en serre



### B- Acclimatation des plants et conditions de croissance optimales



### C- Extraction des plants et dénombrement des racines

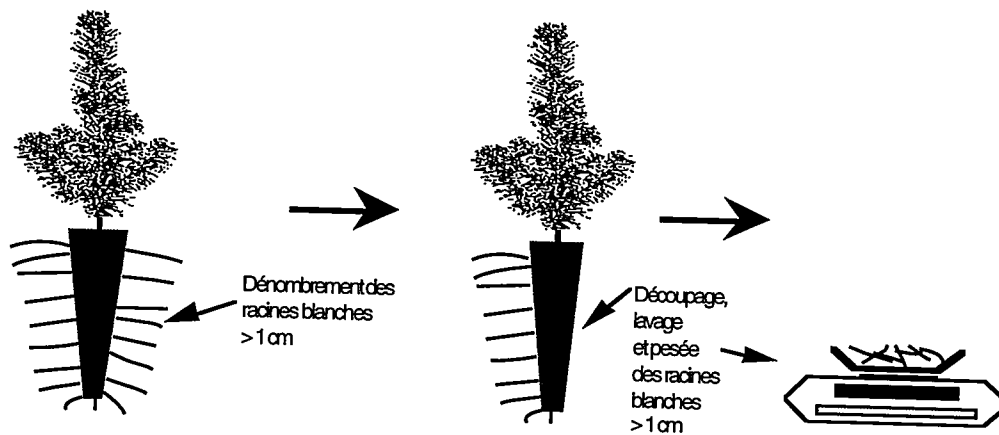


Figure 2.1. Principales étapes de réalisation des tests de capacité de croissance racinaire.

aussi importante de l'architecture des systèmes racinaires. GROSSNICKLE *et al.* (1988) suggèrent même de considérer les processus physiologiques critiques (surface de transpiration des aiguilles par rapport à la surface d'absorption des racines, résistance au froid...) pour évaluer la qualité des lots. Les plants doivent faire l'objet d'une qualification intégrée, où sont évalués une grande quantité de paramètres morphologiques et physiologiques, auxquels s'ajoutent les données essentielles de l'historique de la culture et des caractéristiques des sites de reboisement (GROSSNICKLE *et al.* 1988, BINDER *et al.* 1988, DEANS *et al.* 1990).

À cette qualification intégrée des plants s'ajoutent les tests de capacité de croissance racinaire (C.C.R.), voulus comme une mesure de la santé générale et de la vigueur des plants (BURDETT 1987). Dans cette étude, la C.C.R. est considérée comme un test d'évaluation supplémentaire, qui ne peut à lui seul servir à prédire la performance des plants en plantation (SIMPSON *et al.* 1988, BINDER *et al.* 1988, LANDIS et SKAKEL 1989). Selon SUTTON (1990), la C.C.R. ne peut servir à déterminer le potentiel de performance des plants en plantation, que si les valeurs des tests sont très élevées ou très faibles. PHILIPSON (1990) a démontré, avec des plants de *Picea sitchensis* (Borg.) Carr. annelés au collet et donc privés des produits de la photosynthèse courante, que les hydrates de carbone en réserve dans les racines ont suppléé à la croissance racinaire durant quatorze jours. Les travaux de BURDETT (1990) ont démontré que la croissance racinaire dépend largement de la photosynthèse courante. Cette dernière dépend à son tour de l'assimilation du gaz carbonique aux dépens de l'eau perdue par transpiration. Celle-ci est limitée par l'absorption de l'eau et est donc fonction de la croissance racinaire. La photosynthèse et la croissance racinaire des plants nouvellement mis en terre sont donc interdépendantes. Selon VAN DEN DRIESSCHE (1987), les produits de la photosynthèse constituent la source première de carbone pour les nouvelles racines.

L'objectif principal de notre étude est d'évaluer les effets des traitements azotés et au cuivre sur la physiologie des plants et considère les concentrations des éléments nutritifs, des glucides et de l'amidon dans les tissus ainsi que la capacité de croissance racinaire, pour préciser la concentration de  $\text{CuCO}_3$  et le niveau de fertilisation azotée à recommander. Ces valeurs seront également comparées à celles du premier chapitre (morphologie) afin de vérifier la compatibilité des valeurs morphologiques et physiologiques optimales. En incorporant, sur deux saisons de croissance et en complément à l'analyse morphologique,

une analyse de plusieurs paramètres physiologiques, cette étude permet une évaluation plus globale et rigoureuse des effets du cuivre et des régies nutritionnelles sur les semis d'épinette noire.

## Matériel et méthodes

Les deux types d'analyse (morphologie et physiologie) ont été effectués simultanément sur les mêmes plants; c'est pourquoi cette section ne reprend pas toutes les indications communes déjà présentées dans le premier chapitre (rubrique « Matériel et méthodes », p. 4).

On a mené huit inventaires dans le dispositif *Multipot 45-110* (deux en 1989 et six en 1990) et dix pour le *Trimroot 112* (quatre en 1989 et six en 1990). Les analyses des concentrations en azote, phosphore, potassium, cuivre, calcium, magnésium et manganèse totaux dans les tissus des parties aériennes et racinaires furent effectuées, pour la régie N2 en 1989 et les régies N1-N2-N3 en 1990, pour les traitements suivants : témoin et 100 g/l pour le *45-110*, traité et non traité pour le *Trimroot 112*. L'inventaire effectué à la fin de chaque saison comprenait, quant à lui, tous les traitements pour chaque dispositif. Les éléments minéraux furent extraits à l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) concentré et au peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). L'azote fut quantifié sur un colorimètre *Technicon* tandis que les autres éléments le furent sur un spectrophotomètre au plasma (*ICAP*). Les analyses des concentrations en glucides et amidon dans les tissus des tiges et des racines furent réalisées pour la régie N2 en 1989 et 1990, avec les mêmes traitements que pour les éléments nutritifs. Dans ce cas-ci également, tous les traitements furent évalués en fin de saison. Les glucides furent extraits par plasmolyse à l'éthanol (80 %) chaud (70 °C), dérivés à l'aide d'un réactif (triméthylsilyléther) et quantifiés sur un chromatographe à phase gazeuse (*GC*). L'amidon fut extrait à l'acide perchlorique (35 %), fixé à l'antrone et dosé sur un spectrophotomètre (630 nm). Ces méthodes sont présentées dans VEILLEUX *et al.* (1990). Les concentrations en éléments nutritifs dans les tissus ont été déterminées à partir d'échantillons composites de 18 plants. On a effectué les mêmes regroupements que pour les substrats (chapitre premier) et on a utilisé les plants ayant servi pour les analyses morphologiques. Les plants nécessaires aux analyses de glucides et d'amidon furent récoltés simultanément et leur nombre est passé de 18 (début 1989) à six (1991) par échantillon en fonction d'une masse minimale nécessaire pour les analyses.

**Tableau 2.1. Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la première saison (11 octobre 1989) en fonction des 12 traitements appliqués sur le réceptif 45-110**

	N1				N2				N3			
	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l
N (%) Tige	1,53	1,53	1,57	1,53	1,86	1,67	1,72	1,73	2,09	1,89	1,87	1,87
N (%) Rac.	1,41	1,48	1,64	1,71	1,74	1,67	1,87	1,94	2,14	2,05	2,17	2,19
P (ppm) Tige	3201	3328	3362	3098	3084	3049	3031	2882	3203	3170	2977	3018
P (ppm) Rac.	3923	4280	3977	3757	4522	4315	4030	3827	5003	4909	4189	3988
K (ppm) Tige	8509	9340	9880	9742	8192	9219	9753	9062	8010	8597	8955	9161
K (ppm) Rac.	9029	9089	7955	7367	9823	9697	8114	7304	9732	9924	7948	7236
Cu (ppm) Tige	98	87	59	65	90	51	53	-	46	68	56	63
Cu (ppm) Rac.	135	131	307	208	119	114	202	202	92	124	215	244
Ca (ppm) Tige	2199	1957	1662	1457	2101	1896	1600	1544	2521	2218	1881	1616
Ca (ppm) Rac.	3073	3202	3078	3011	3220	3084	2955	2847	3169	3108	2875	2959
Mg (ppm) Tige	1395	1033	985	978	1351	984	949	954	1390	1045	958	952
Mg (ppm) Rac.	2021	1569	1384	1379	1836	1505	1445	1634	1915	1655	1430	1319
Mn (ppm) Tige	517	196	187	153	440	180	158	139	427	186	160	136
Mn (ppm) Rac.	274	108	99	93	242	98	89	85	232	97	94	86

**Tableau 2.2. Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la première saison (11 octobre 1989) en fonction des 12 traitements appliqués sur le réceptif 45-110**

	N1				N2				N3			
	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l
FGS (g/mg)	116	120	103	107	125	131	124	121	131	134	134	132
Acides (g/mg)	94	80	90	91	81	85	89	91	82	85	94	96
Polyols (g/mg)	22	20	21	22	21	24	22	23	23	22	23	26
Tréhalose (g/mg)	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
Raffinose (g/mg)	8	8	10	11	11	9	10	9	12	13	9	9
Amidon (g/mg) T.	41	42	42	38	50	47	49	50	46	50	47	44
Amidon (g/mg) R.	88	89	71	71	105	93	92	84	106	95	84	85

**Tableau 2.3. Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990) en fonction des 12 traitements appliqués sur le réceptif 45-110**

Tiges	N1				N2				N3			
	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l
N (%)	0,99	1,01	0,88	0,91	1,14	1,16	1,09	1,04	1,47	1,54	1,33	1,26
P (ppm)	2277	2518	2111	2026	2016	2180	2140	1939	2177	2253	2141	1931
K (ppm)	8440	9326	9130	8624	7623	8541	8340	7950	7523	7854	8162	7579
Cu (ppm)	27	6	10	17	29	14	36	42	7	8	7	45
Ca (ppm)	3768	3946	2282	1735	3737	3180	2063	1612	3468	3151	2054	1476
Mg (ppm)	1053	799	653	632	1104	778	673	607	1041	740	658	594
Mn (ppm)	374	214	141	94	282	167	113	76	242	154	108	68
Racines	N1				N2				N3			
	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l
N (%)	0,95	1,03	1,21	1,25	1,04	1,08	1,22	1,26	1,29	1,32	1,36	1,41
P (ppm)	2720	2905	2587	2329	2741	2798	2497	2370	2850	2907	2568	2388
K (ppm)	6963	7197	5413	4864	6842	7204	5225	4510	7413	7329	5314	4435
Cu (ppm)	20	35	218	274	14	24	244	343	19	11	210	368
Ca (ppm)	2289	2322	2151	2225	2131	2210	2083	1908	1940	2088	1768	1708
Mg (ppm)	1912	1825	2490	4649	1815	2195	2625	4762	1719	1884	2689	5944
Mn (ppm)	56	60	56	52	37	52	45	45	38	42	40	41

Des tests de capacité de croissance racinaire (C.C.R.) ont été effectués à la fin de la deuxième saison de croissance (octobre 1990), afin d'évaluer la capacité qu'ont les plants de reprendre leur activité de croissance racinaire normale lorsqu'ils ne sont plus soumis aux traitements au cuivre. Les conditions culturales des tests de C.C.R., proposées par BURDETT (1983), ont été adaptées aux réalités climatiques du Québec. Les plants furent récoltés le 30 octobre 1990, repotés dans des pots de 5 litres (quatre plants par pot pour le 45-110 et trois pour le *Trimroot 112* ; substrat tourbe : vermiculite 3 : 1 à 0,1 g/cm<sup>3</sup>) et placés en serre pour une période de 12 jours d'acclimatation. Durant cette période, les plants ont été progressivement amenés à des températures de 15 °C la nuit et 20 °C le jour et à 16 heures de photopériode artificielle (lampes au sodium à haute pression). Les plants ont été maintenus dans ces conditions pour les 21 jours suivants. Les semis furent par la suite extraits des pots et les racines blanches de plus de 1 cm dénombrées, coupées, lavées et pesées. L'annexe C présente la chronologie des étapes de réalisation des tests de C.C.R. et la figure 2.1 les présente sous forme schématique.

Nous n'avons réalisé des analyses statistiques que pour les tests de C.C.R. Les analyses de variance ont été exécutées à l'aide du logiciel SAS selon la procédure GLM et les moyennes différentes ont été séparées à l'aide du test de Waller-Duncan (SAS USER'S GUIDE : BASICS 1985; STATISTICS 1985). Les regroupements effectués avec les tissus (éléments nutritifs, sucres et amidon) en vue d'obtenir seulement quatre échantillons composites n'ont pas permis d'analyses statistiques rigoureuses pour les tissus, le calcul de la variance n'était pas représentatif du plan d'expérience retenu. En conséquence, les analyses statistiques n'ont pas été effectuées et les intervalles de confiance de la moyenne n'ont pu être incorporés aux graphiques. Les résultats des inventaires en cours de saison ont servi à établir les profils saisonniers des différents paramètres évalués.

## Résultats

Expérience numéro 1 : *Multipot 45-110 + CuCO<sub>3</sub>*

- Concentrations des éléments nutritifs, des glucides et de l'amidon dans les tissus à la fin de la première saison de croissance

Une élévation du niveau de la fertilisation azotée se traduisait par une augmentation proportionnelle des concentrations tissulaires en azote dans les tiges et les racines (tableau 2.1). Le phosphore dans les

racines subissait le même effet, principalement pour le témoin et le traitement au latex. La concentration en potassium dans les tiges diminuait en raison d'une augmentation de la dose d'azote et elle était plus élevée pour N2 et N3 dans les racines des témoins et des plants traités au latex. La concentration en calcium dans les tiges était légèrement supérieure sous la régie N3. Chez les témoins, la concentration en cuivre diminuait en fonction d'une augmentation de la fertilisation azotée. Le magnésium et le manganèse n'étaient aucunement affectés par l'utilisation des différentes régies nutritionnelles. La concentration en cuivre dans les racines était supérieure pour les traitements 50 et 100 g/l de CuCO<sub>3</sub>, tandis qu'on observait peu de différence au niveau des tiges. La concentration en phosphore et potassium dans les racines diminuait lorsque celle du cuivre était élevée; cependant, les valeurs pour le potassium dans les tiges augmentaient avec les traitements au CuCO<sub>3</sub>. Indépendamment de la régie azotée, les concentrations en azote dans les tissus des racines s'accroissaient avec les traitements 50 et 100 g/l. Les concentrations en calcium (tiges) et magnésium (racines) étaient plus élevées pour les traitements exempts de cuivre. Les plants témoins contenaient plus de magnésium (tiges) et de manganèse (tiges et racines) que ceux des autres traitements.

Une élévation du niveau azoté a entraîné une augmentation des concentrations en fructose, glucose et saccharose (FGS) et en amidon dans les tissus (tableau 2.2). Les traitements de 50 et 100 g/l montraient des concentrations en amidon dans les racines inférieures à celles du témoin et du traitement au latex. La concentration en amidon était plus forte dans les racines que dans les tiges.

- Concentrations des éléments nutritifs dans les tissus au cours et à la fin de la seconde saison

La concentration en azote dans les tissus des tiges était plus élevée pour les témoins (figure 2.2), tandis qu'elle était supérieure, pour le 100 g/l de CuCO<sub>3</sub>, dans les racines. Les concentrations en azote dans les tissus des tiges et des racines étaient directement proportionnelles aux doses d'azote appliqué. Les traitements au cuivre affectaient l'accumulation de cet élément (Cu) dans les systèmes racinaires (figure 2.3). Les concentrations en magnésium dans les racines suivaient la même tendance (tableau 2.3). Le cuivre modifiait à la baisse la concentration tissulaire du phosphore dans les racines (figure 2.4) et les tiges. Le potassium (racines), le calcium (tiges et racines), le magnésium (tiges) et le manganèse (tiges) diminuaient également.

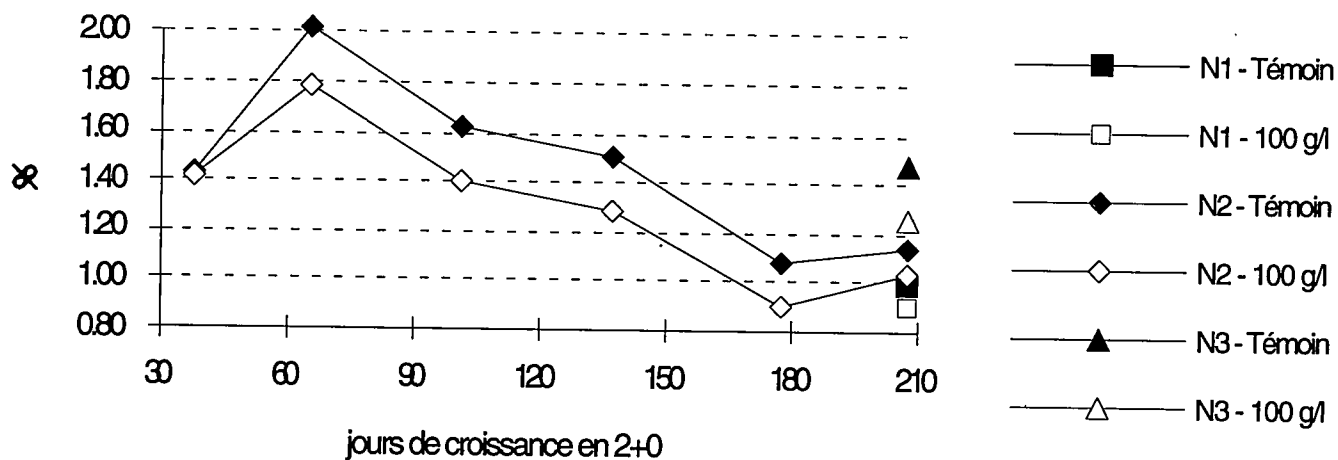


Figure 2.2. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en azote dans les tissus des tiges en fonction des traitements témoin et 100 g/l appliqués sur le récipient 45-110.

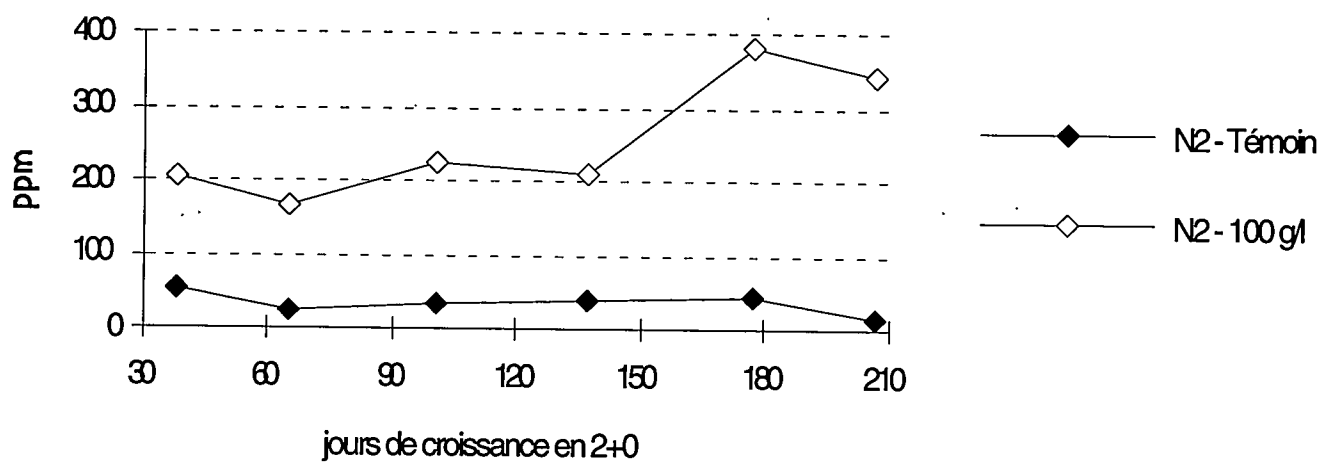


Figure 2.3. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en cuivre dans les tissus des racines, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110.

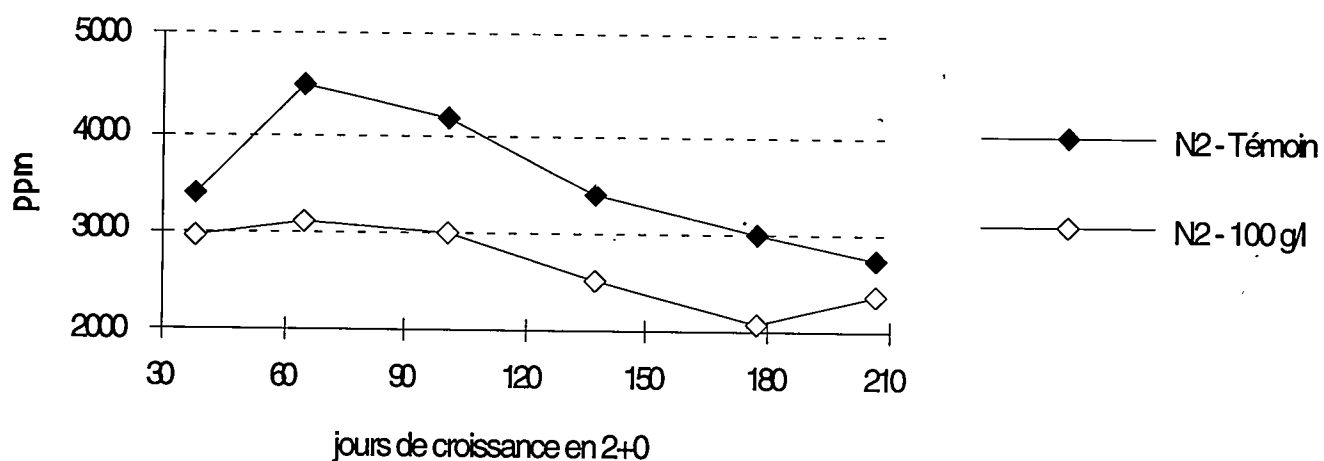


Figure 2.4. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en phosphore dans les tissus des racines, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110.

Le tableau 2.3 présente le bilan final de la fin de la deuxième saison de croissance. Outre leurs effets sur les concentrations en azote dans les tissus, les différentes doses de fertilisation azotée affectaient le phosphore (tiges;  $N1 > N2$  et  $N3$  pour le témoin et le latex), le potassium (tiges;  $N1 > N2 > N3$ ) et plus modestement le calcium (tiges et racines;  $N1 \geq N2 \geq N3$ ) et le manganèse (tiges;  $N1 > N2 \geq N3$  principalement pour le témoin, le latex et le 50 g/l). En plus d'avoir des effets importants sur les concentrations en cuivre dans les tissus, les traitements à base de  $CuCO_3$  ont affecté l'accumulation de tous les éléments minéraux quantifiés dans cette étude. Les résultats obtenus avec une concentration de 50 g/l étaient généralement de moitié moins importants que ceux qu'entraînait un concentré de 100 g/l de cuivre. La situation peut se résumer ainsi : N tiges = ↓ à 50 et ↓↓ à 100 g/l; N racines = ↑ à 50 et ↑↑ à 100 g/l ; P tiges et racines = ↓ à 50 et ↓↓ à 100 g/l; K racines = ↓ à 50 et ↓↓ à 100 g/l; Ca tiges et racines = ↓ à 50 et ↓↓ à 100 g/l; Mg tiges = ↑ à 50 et ↑↑ à 100 g/l; Mg racines = ↓ à 50 et ↓↓ à 100 g/l et Mn tiges = ↓ à 50 et ↓↓ à 100 g/l. Les systèmes racinaires étaient principalement affectés par les traitements au cuivre. Le latex seul n'exerçait qu'une influence minime sur les concentrations dans les tissus des tiges (P = ↑; K = ↑; Mn = ↓).

- Concentrations des glucides et de l'amidon dans les tissus au cours et à la fin de la seconde saison

Les tiges constituaient la principale zone d'accumulation des réserves en glucides (tableau 2.4). Les traitements au cuivre ont eu une incidence généralement positive sur les concentrations en glucides dans les tiges et plutôt négative pour ce qui est des racines. Les plants traités au cuivre présentaient dans les tissus des tiges, en fin de saison, des concentrations plus élevées des sucres suivants : les FGS (fructose, glucose et saccharose), les polyols (inositol, mannitol, pinitol et sequoyitol), le tréhalose et le raffinose. Les concentrations en FGS, polyols, tréhalose et raffinose dans les racines étaient légèrement inférieures, en fin de saison, pour les plants soumis au traitement de 100 g/l de  $CuCO_3$ . La figure 2.5 présente le profil saisonnier du FGS dans les tiges. Le bilan de fin de saison (tableau 2.4) démontre que les concentrations en sucres solubles n'étaient presque pas affectées par les différentes doses d'azote et que le traitement à 50 g/l exerçait généralement des effets moindres que celui de 100 g/l de  $CuCO_3$ .

Les concentrations en amidon dans les tissus des tiges étaient plus élevées sous les régies nutritionnelles N2 et N3 (tableau 2.4). Les traitements au  $CuCO_3$  ont légèrement favorisé l'accumulation des réserves

en amidon dans les tiges et diminué celles des racines (pour une régie donnée). En général, la régie N2 présentait les concentrations les plus importantes. La figure 2.6 présente le profil saisonnier de l'amidon dans les racines.

- Tests de capacité de croissance racinaire à la fin de la seconde saison

Le nombre de racines blanches issues des tests de capacité de croissance racinaire (C.C.R.) était nettement plus élevé dans le cas de la régie nutritionnelle N3 (tableau 2.5). Quand le niveau de fertilisation azotée était élevé, la masse des racines blanches augmentait en conséquence. Les traitements au cuivre ne se sont avérés néfastes sur la C.C.R. que pour la concentration de 100 g/l de  $CuCO_3$ ; le nombre et la masse des racines blanches de plus de 1 cm y étaient nettement inférieurs.

Les plants témoins développaient leurs nouvelles racines principalement dans le dernier tiers de la carotte et celles-ci étaient dirigées verticalement vers le bas. Cependant, plusieurs plants présentaient de longues racines très fines, réparties uniformément tout autour de la carotte. L'architecture des nouvelles elongations racinaires, en ce qui touche le traitement au latex seul, était identique à celle des témoins, à cette exception près que les racines réparties tout autour de la carotte présentaient des diamètres plus variables. Les plants soumis au traitement 50 g/l de  $CuCO_3$  révélaient des architectures racinaires très variées, qui se présentaient généralement ainsi : raréfaction des racines sur la surface de la carotte; la demie inférieure de la carotte étant généralement la plus colonisée, plusieurs plants avaient une croissance racinaire importante à la base. Le développement racinaire des plants traités à 100 g/l se situait principalement dans le haut et le bas de la carotte et il était clairsemé. Le développement de nouvelles racines dans la partie supérieure était partiellement attribuable à la formation de racines adventives, les plants ayant été enterrés plus profondément pour leur assurer un maintien adéquat durant les tests. La figure 2.7 présente un exemple du développement racinaire pour chacun des quatre traitements.

\* \* \*

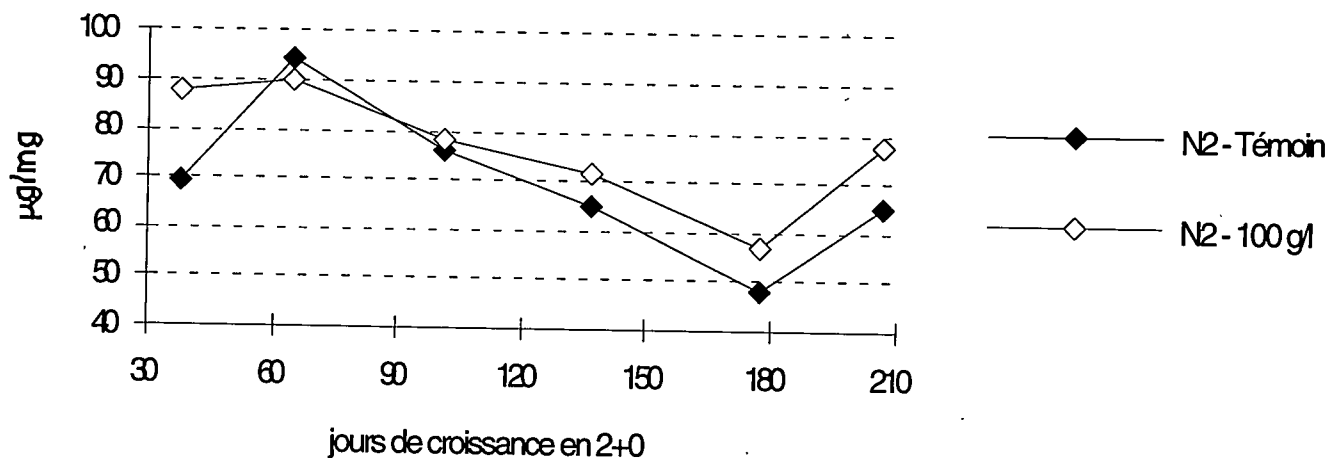


Figure 2.5. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en FGS dans les tissus des tiges, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110.

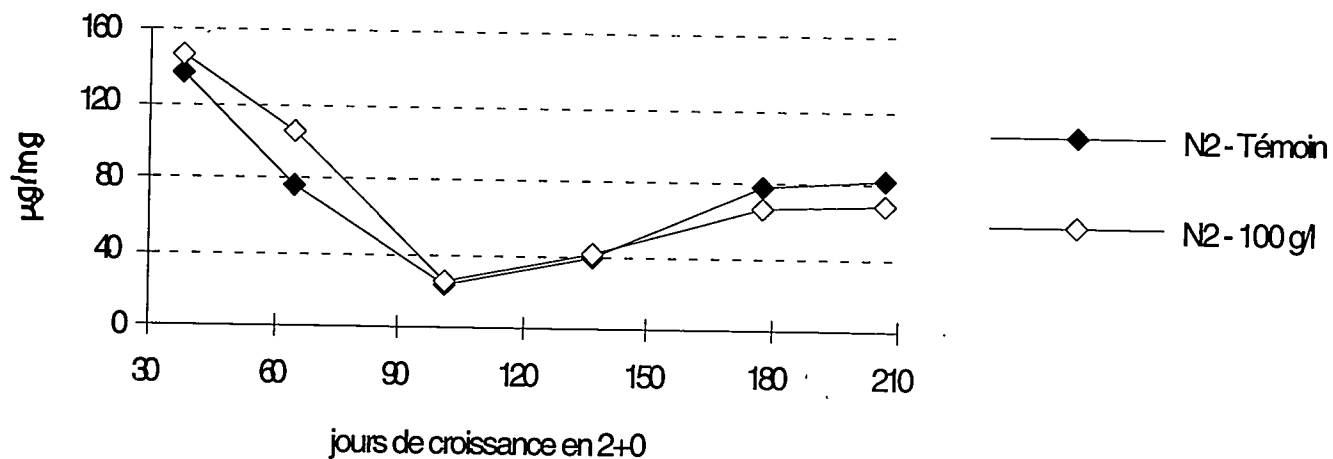


Figure 2.6. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en amidon dans les tissus des racines, pour les plants témoin et 100 g/l soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient 45-110.

**Tableau 2.4. Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la seconde saison (24 octobre 1990) en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110**

Tiges	N1				N2				N3			
	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l
FGS (g/mg)	73	70	81	84	65	67	73	78	67	73	71	77
Acides (g/mg)	37	30	34	38	36	32	32	36	36	36	33	37
Polyols (g/mg)	20	19	23	24	19	20	20	22	19	21	21	21
Tréhalose (g/mg)	1,0	1,0	1,1	1,1	0,6	0,7	1,0	1,0	0,6	0,6	0,9	1,2
Raffinose (g/mg)	14	15	15	17	11	15	16	16	13	14	15	17
Amidon (g/mg)	39	42	46	42	47	46	48	50	41	44	52	48

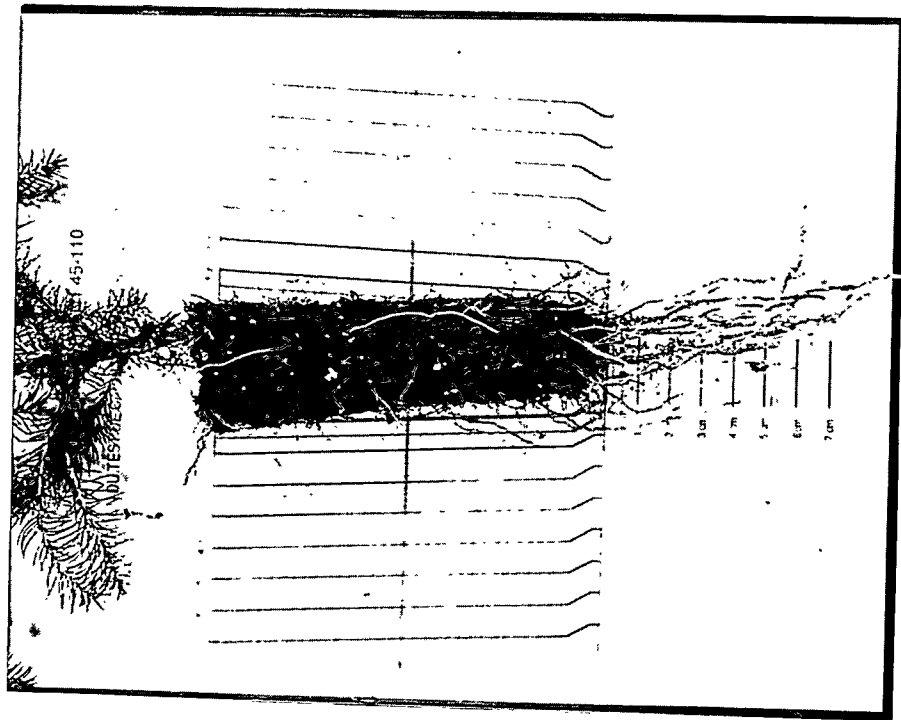
Racines	N1				N2				N3			
	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l	T	L	50 g/l	100 g/l
FGS (g/mg)	34	33	31	26	31	32	32	31	40	35	34	26
Acides (g/mg)	4,0	3,8	2,9	2,9	4,1	3,9	3,3	3,3	3,9	4,0	3,8	2,6
Polyols (g/mg)	6,2	5,0	4,5	3,8	6,1	4,8	4,7	4,2	5,8	5,6	5,4	3,6
Tréhalose (g/mg)	4,4	4,3	4,4	2,9	4,1	4,1	3,9	1,8	3,8	3,9	3,2	2,0
Raffinose (g/mg)	7,0	7,7	5,7	4,8	8,1	7,8	6,4	6,4	9,4	9,3	6,6	4,9
Amidon (g/mg)	62	71	60	53	82	70	76	70	66	68	75	44

**Tableau 2.5. Bilan des tests de capacité de croissance racinaire du 30 octobre 1990 en fonction des 12 traitements appliqués sur le récipient 45-110**

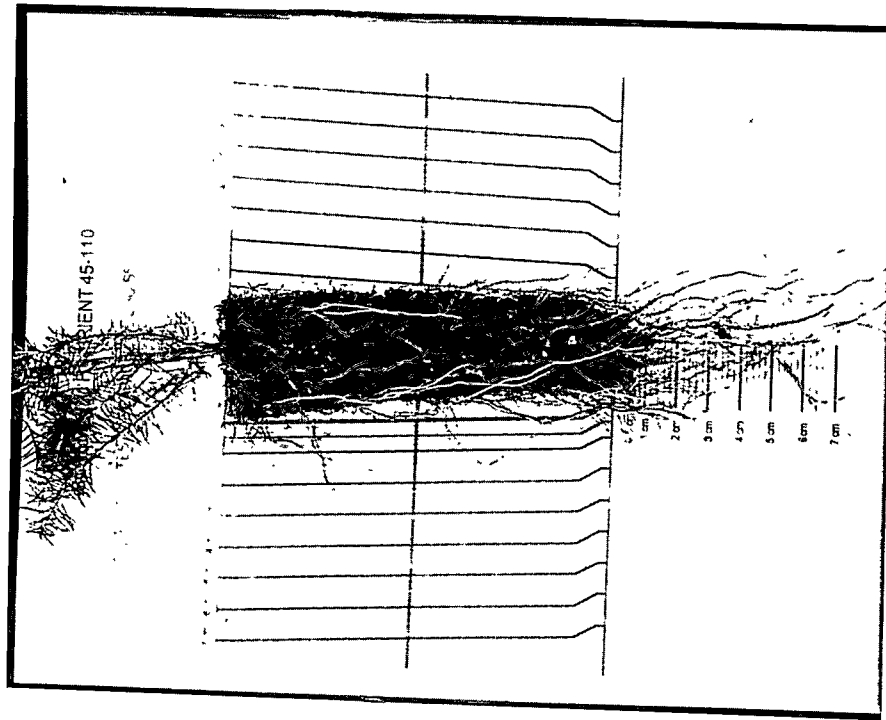
Traitement	Nombre de racines blanches > 1 cm	Masse racines blanches (mg)
N1	30 b	30 c
N2	37 b	41 b
N3	50 a	56 a
Témoin	45 a	52 a
Latex	46 a	49 a
50 g/l	38 a	44 a
100 g/l	26 b	25 b

Moyenne sur 24 plants.

Verticalement, pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

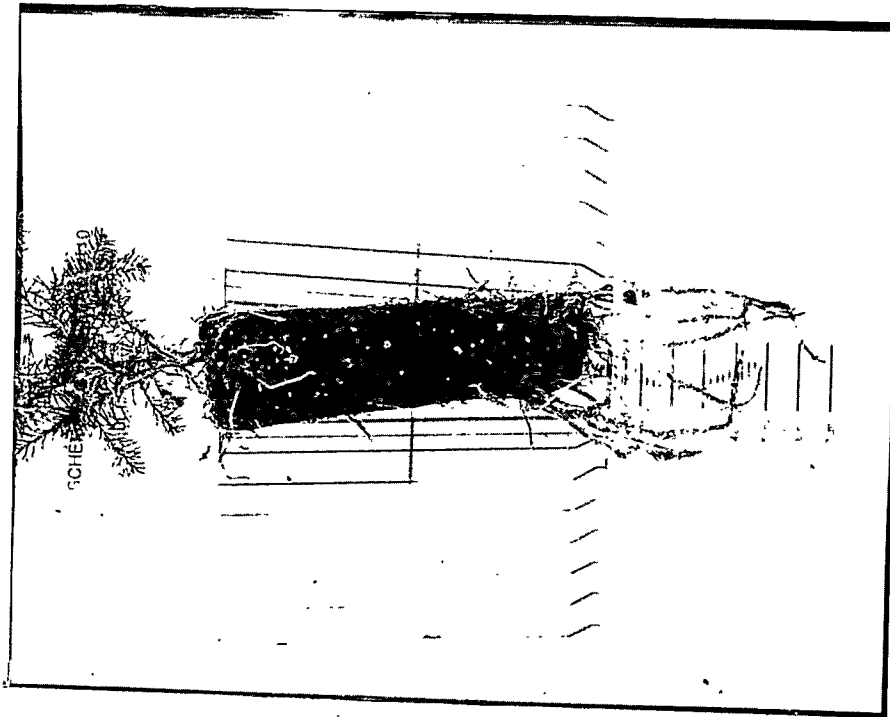


N2 - Témoin

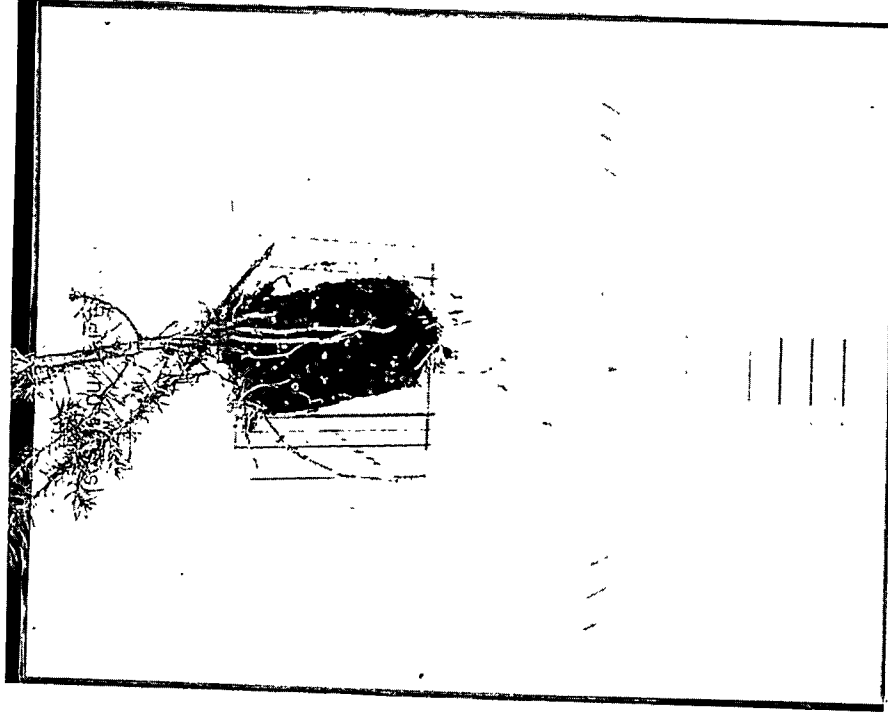


N3 - Latex

Figure 2.7. Nouvelles racines blanches produites lors des tests de C.C.R. dans le récipient 45-110 pour les quatre traitements.



N2 - 50 g/l CuCO<sub>3</sub>



N3 - 100 g/l CuCO<sub>3</sub>

Figure 2.7 (fin). Nouvelles racines blanches produites lors des tests de C.C.R. dans le récipient 45-110 pour les quatre traitements.

Expérience numéro 2 : *Trimroot 112*

- Concentrations des éléments nutritifs, des glucides et de l'amidon à la fin de la première saison de croissance

Les concentrations en azote dans les tissus des tiges et des racines étaient directement affectées par une augmentation du niveau de fertilisation azotée (tableau 2.6). La concentration en phosphore dans les tiges diminuait en raison d'une augmentation du niveau d'azote. Le potassium dans les tiges et les racines et, plus modestement, le calcium dans les tiges subissaient le même sort. Pour ce qui est du calcium, la concentration dans les tissus des racines s'élevait légèrement sous l'influence d'une augmentation des doses d'azote appliquées. Les plants produits dans les récipients traités présentaient dans les racines des concentrations en cuivre plus importantes que les témoins (non traités). Le traitement au cuivre affectait aussi à la hausse la teneur en azote dans les tiges et les racines. Les concentrations en phosphore (tiges sauf N3 et racines) et en potassium (tiges) avaient la même tendance. Les teneurs en calcium (tiges et racines) et en manganèse (racines) subissaient, quant à elles, l'effet contraire.

Les concentrations en amidon s'accroissaient en fonction d'une augmentation du niveau d'azote et elles étaient plus élevées dans les racines que dans les tiges (tableau 2.7). Les concentrations en acides

(shikimique et quinique) dans les racines diminuaient sous l'influence du cuivre, tandis qu'elles augmentaient pour le tréhalose (tiges) et le raffinose (tiges et racines).

- Concentrations des éléments nutritifs dans les tissus au cours et à la fin de la seconde saison

La concentration en azote dans les tissus des tiges et des racines était directement proportionnelle au niveau de fertilisation reçue (figure 2.8) et elle était plus élevée dans les racines chez les plants traités (tableau 2.8). Les traitements au cuivre ont directement influencé la concentration de cet élément dans les tissus des racines (figure 2.9); aucun effet notable n'a cependant été observé dans les tiges. L'accumulation du phosphore dans les racines était accélérée par le traitement au cuivre (figure 2.10). La concentration du manganèse dans les tissus des tiges diminuait en raison d'une augmentation de la dose d'azote. De légères réductions étaient également perceptibles pour le potassium (tiges) et le calcium (tiges et racines). Le traitement au cuivre a agi non seulement sur l'azote, mais sur tous les autres éléments nutritifs. Les concentrations en phosphore (racines), potassium (tiges), et magnésium (racines) étaient supérieures dans les tissus des plants soumis au traitement au cuivre, qui avait, cependant, un effet contraire sur le potassium (racines), le calcium (tiges) et le manganèse (tiges).

**Tableau 2.6. Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la première saison (16 octobre 1989) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient *Trimroot 112***

	N1		N2		N3	
	Non traité	Traité	Non traité	Traité	Non traité	Traité
N (%) Tige	1,33	1,39	1,62	1,77	1,73	1,76
N (%) Rac.	1,26	1,47	1,46	1,69	1,84	1,87
P (ppm) Tige	3362	3613	3203	3401	3109	2956
P (ppm) Rac.	3697	4389	3749	4246	4020	4249
K (ppm) Tige	9381	9981	8799	9139	8397	8749
K (ppm) Rac.	8790	8864	8654	7728	7958	7649
Cu (ppm) Tige	22	20	22	31	22	31
Cu (ppm) Rac.	70	175	76	148	75	189
Ca (ppm) Tige	2440	2062	2475	2031	2222	1911
Ca (ppm) Rac.	2848	2595	2826	2607	2959	2702
Mg (ppm) Tige	1222	1306	1224	1287	1181	1181
Mg (ppm) Rac.	1991	1687	1785	1738	1878	1848
Mn (ppm) Tige	484	394	431	376	402	327
Mn (ppm) Rac.	267	190	229	176	216	159

**Tableau 2.7. Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la première saison (16 octobre 1989) en fonction des six traitements appliqués sur le réceptif *Trimroot 112*.**

	N1		N2		N3	
	Non traité	Traité	Non traité	Traité	Non traité	Traité
FGS (g/mg)	113	103	120	113	112	125
Acides (g/mg)	67	71	70	68	63	76
Polyols (g/mg)	18	18	19	20	18	19
Tréhalose (g/mg)	4	4	4	3	4	5
Raffinose (g/mg)	14	16	13	17	9	19
Amidon (g/mg) T.	46	48	49	51	52	57
Amidon (g/mg) R.	95	99	103	117	114	118

– Concentrations des glucides et de l'amidon dans les tissus au cours et à la fin de la seconde saison

Les traitements au cuivre n'ont pas eu d'influence déterminante sur les concentrations en glucides dans les tiges et les racines. La figure 2.11 montre le profil saisonnier du FGS (fructose, glucose et saccharose) dans les tiges, et le tableau 2.9 présente le bilan global de fin de saison. Les concentrations en FGS (tiges), tréhalose (tiges) et raffinose (tiges et racines) étaient même plus élevées chez les plants traités au cuivre. À l'exception du FGS (racines), les concentrations en

glucides dans les tissus étaient très peu affectées par les différentes doses d'azote. Les concentrations les plus importantes en glucides, à l'exception du tréhalose, se retrouvaient dans les tissus des tiges.

Les concentrations en amidon dans les tiges diminuaient en proportion de l'augmentation du niveau azoté, tandis qu'elles augmentaient dans les racines (figure 2.12). Le traitement au cuivre a permis un accroissement de l'accumulation de l'amidon dans les tiges et les racines (sauf N3) (tableau 2.9).

**Tableau 2.8. Bilan des concentrations en éléments nutritifs dans les tissus à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990) en fonction des six traitements appliqués sur le réceptif *Trimroot 112***

Tiges	N1		N2		N3	
	Non traité	Traité	Non traité	Traité	Non traité	Traité
N (%)	0,90	0,85	1,01	1,05	1,42	1,46
P (ppm)	2187	2217	2112	1961	2215	2236
K (ppm)	7536	8431	7650	8216	7204	8057
Cu (ppm)	35	41	39	29	10	38
Ca (ppm)	3729	2766	3717	2631	3606	2462
Mg (ppm)	1019	1103	1142	995	1101	1119
Mn (ppm)	295	206	252	160	211	148

Racines	N1		N2		N3	
	Non traité	Traité	Non traité	Traité	Non traité	Traité
N (%)	0,85	1,00	0,90	1,10	1,09	1,29
P (ppm)	2380	2860	2430	2861	2578	2842
K (ppm)	6534	6275	6751	6328	6973	5826
Cu (ppm)	25	362	12	284	42	296
Ca (ppm)	1941	1807	1951	1762	1760	1512
Mg (ppm)	1907	2260	1956	2073	1984	2629
Mn (ppm)	49	54	39	39	29	35

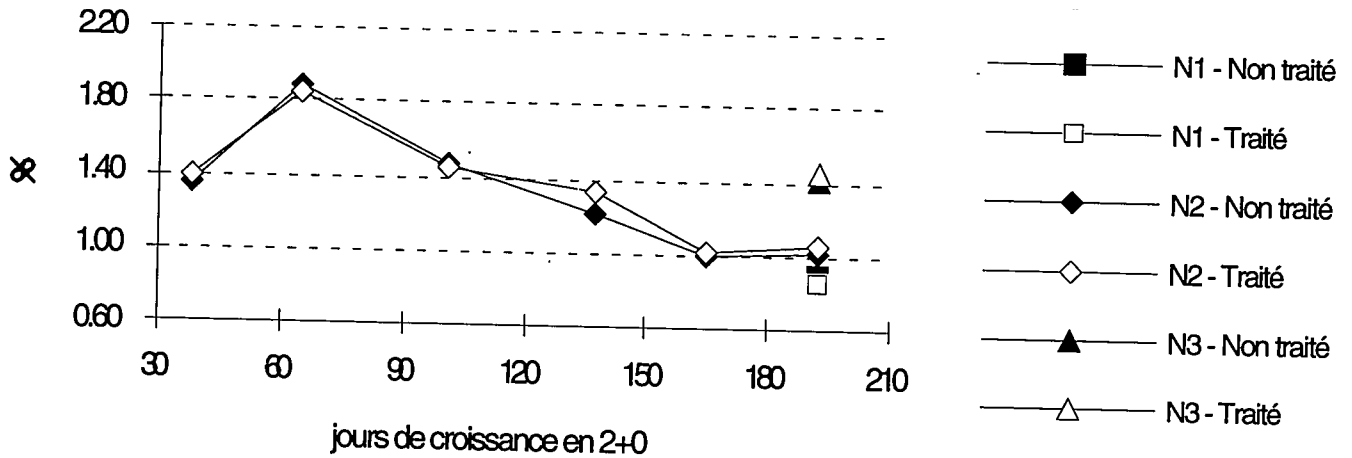


Figure 2.8. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en azote dans les tissus des tiges, en fonction des six traitements appliqués sur le récipient *Trimroot 112*.

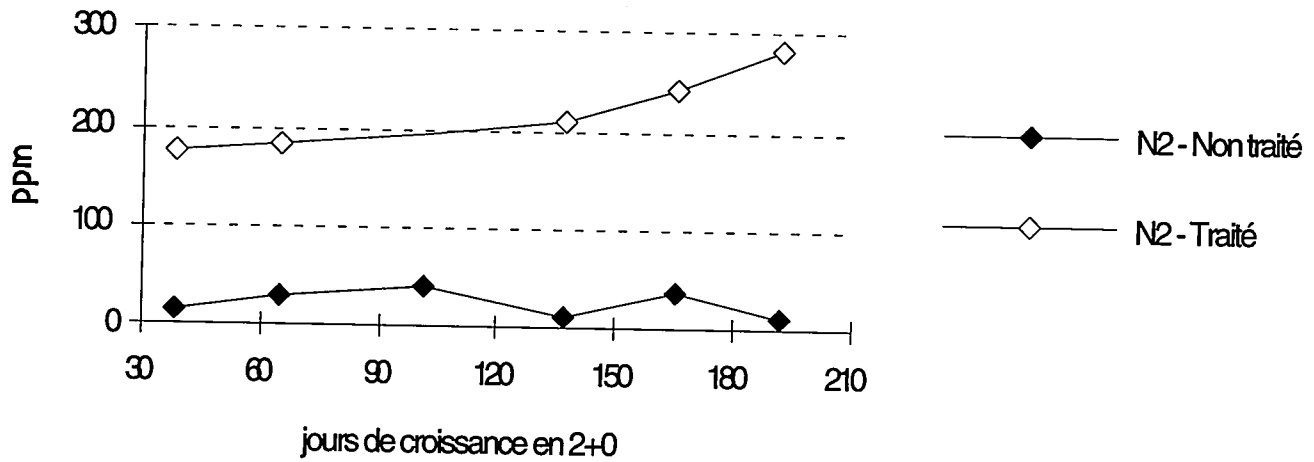


Figure 2.9. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en cuivre dans les tissus des racines, en fonction des six traitements appliqués sur le récipient *Trimroot 112*.

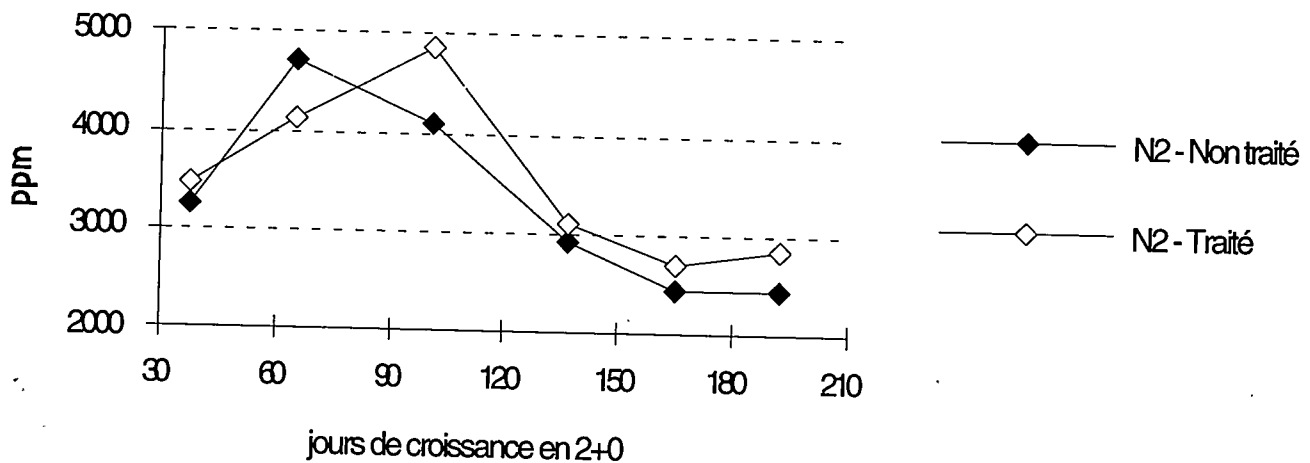


Figure 2.10. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en phosphore dans les tissus des racines, en fonction des six traitements appliqués sur le récipient *Trimroot 112*.

**Tableau 2.9. Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990) en fonction des six traitements appliqués sur le réceptif *Trimroot 112***

Tiges	N1		N2		N3	
	Non traité	Traité	Non traité	Traité	Non traité	Traité
FGS (g/mg)	45	72	59	69	55	61
Acides (g/mg)	28	40	36	42	39	37
Polyols (g/mg)	13	19	19	19	19	19
Tréhalose (g/mg)	0,7	1,3	0,7	1,2	0,6	1,0
Raffinose (g/mg)	3,2	5,3	3,2	4,6	3,1	4,0
Amidon (g/mg)	58	75	52	65	43	52
Racines	N1		N2		N3	
	Non traité	Traité	Non traité	Traité	Non traité	Traité
FGS (g/mg)	25	27	26	28	37	30
Acides (g/mg)	4,1	4,0	4,2	3,9	5,8	4,1
Polyols (g/mg)	5,2	4,3	4,8	4,4	7,0	4,5
Tréhalose (g/mg)	4,4	4,2	4,0	5,2	3,6	4,1
Raffinose (g/mg)	2,5	3,0	1,8	3,1	2,8	2,9
Amidon (g/mg)	62	76	69	83	97	85

**- Tests de capacité de croissance racinaire à la fin de la seconde saison**

Le nombre et la masse des racines blanches de plus de 1 cm étaient clairement plus élevés dans le cas des régies nutritionnelles N2 et N3 (tableau 2.10). Les semis traités au cuivre présentaient un nombre nettement plus élevé de racines blanches de plus de 1 cm que celui des plants non traités. La masse des racines blanches suivait la même règle.

Le développement racinaire des plants non traités (figure 2.13) était identique à celui des plants témoins (45-110) : développement des racines vers le bas de la carotte (principalement dans le tiers inférieur) et présence de racines longues de faible diamètre parsemées sur le reste de la motte. Les plants traités, quant à eux, présentaient un développement racinaire uniforme sur toute la surface de la carotte (présence de racines latérales longues à toutes les hauteurs). Le système racinaire produit lors des tests de C.C.R., avec les plants cultivés dans les récipients traités au cuivre, était semblable à celui d'un semis naturellement établi.

**Tableau 2.10. Bilan des tests de capacité de croissance racinaire du 30 octobre 1990 en fonction des six traitements appliqués sur le réceptif *Trimroot 112***

Traitement	Nombre de racines blanches > 1 cm	Masse racines blanches (mg)
N1	34 b	26 b
N2	55 a	48 a
N3	62 a	54 a
Non traité	40 b	31 b
Traité	61 a	55 a

Moyenne sur 24 plants.

Verticalement, pour chaque groupe, les moyennes suivies de lettres distinctes présentent des différences significatives au seuil de 95 % selon la méthode de Waller-Duncan.

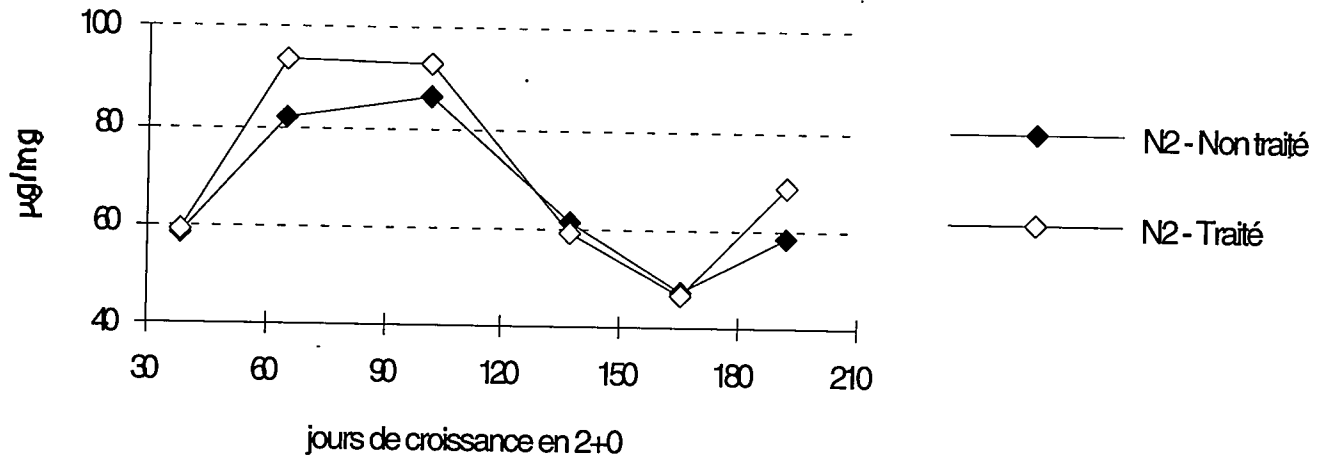


Figure 2.11. Progression, au cours de la seconde saison, de la concentration en FGS dans les tissus des tiges, pour les plants soumis à la régie nutritionnelle N2 dans le récipient *Trimroot 112*.

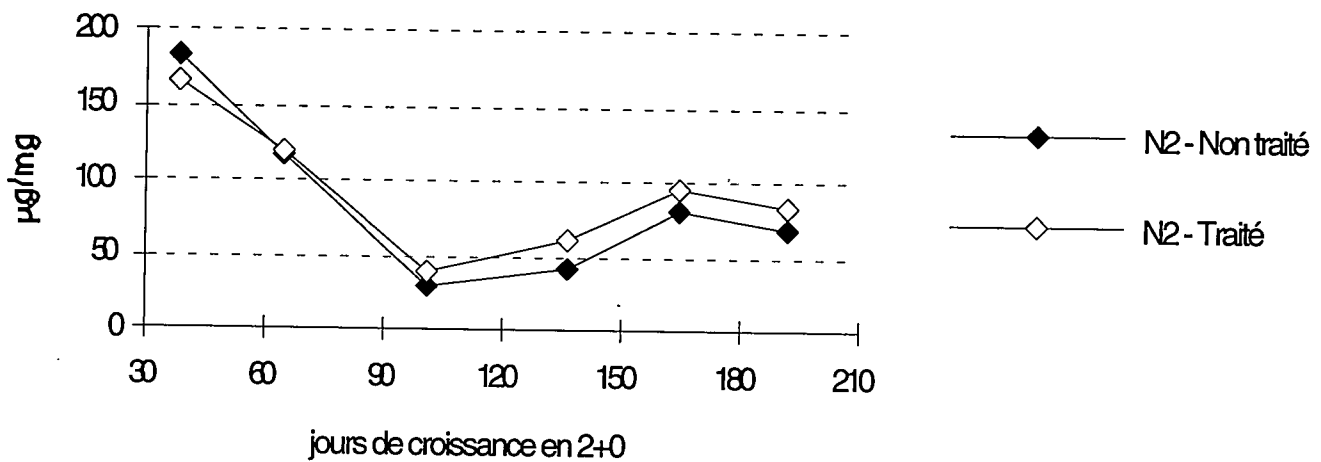
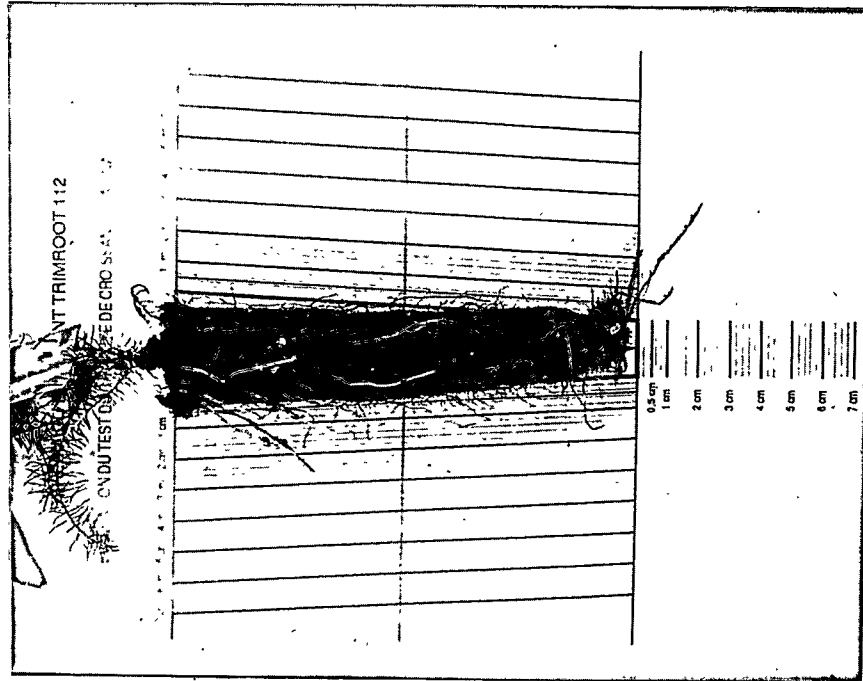
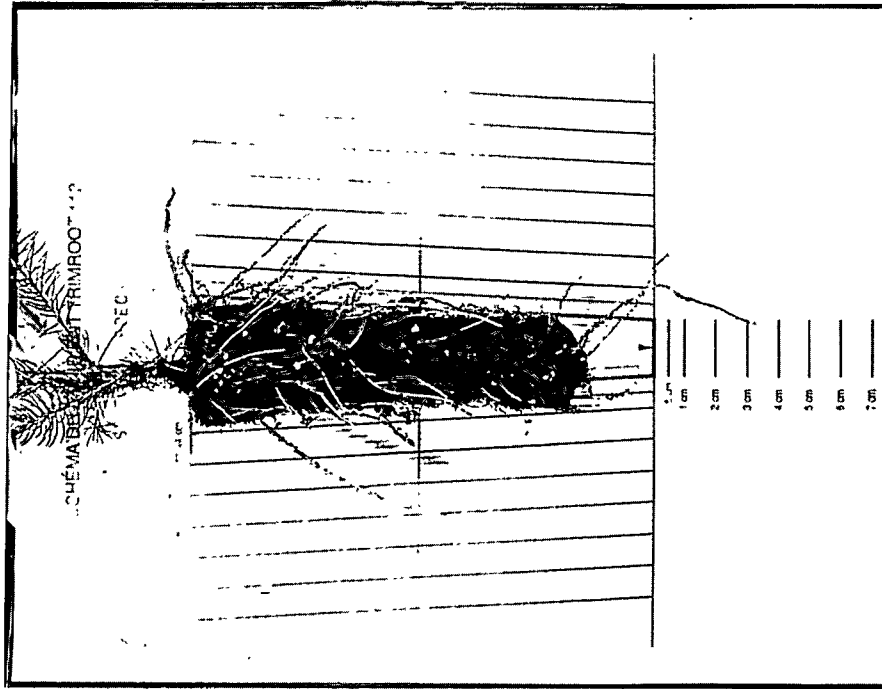


Figure 2.12. Bilan des concentrations en glucides et en amidon dans les tissus à la fin de la seconde saison (9 octobre 1990) en fonction des six traitements appliqués sur le récipient *Trimroot 112*.



N2 - Non traité



N2 - Traité

Figure 2.13. Nouvelles racines blanches produites lors des tests de C.C.R. dans le récipient *Trimroot 112* pour les deux traitements.

## Discussion et conclusions

Les expériences entreprises à la pépinière de Grandes-Piles, durant les saisons 1989-1990, ont permis d'évaluer les effets des traitements à l'azote et au cuivre sur la physiologie des plants, plus particulièrement sur les concentrations en éléments nutritifs, en sucres solubles et en amidon dans les tissus et sur la capacité de croissance racinaire, et elles ont également permis de préciser les traitements à recommander. L'importance des paramètres physiologiques dans l'évaluation des traitements, mise en évidence par plusieurs auteurs (GROSSNICKLE *et al.* 1988; BINDER *et al.* 1988; DEANS *et al.* 1990), a été aussi démontrée dans cette étude sur l'épinette noire. L'introduction du test de capacité de croissance racinaire (C.C.R.), paramètre récent d'évaluation physiologique, a permis d'évaluer l'architecture du développement racinaire des plants soumis aux différents traitements, ainsi que de préciser les conditions culturales des tests. Le concept de qualification intégrée (morphologie, physiologie, C.C.R. et plantations de qualification), retenu comme mode d'évaluation dans cette étude, a permis d'élargir le cadre habituel de la qualification des plants produits. Très peu d'études ont, à ce jour, porté sur deux saisons complètes de suivi et comporté une évaluation aussi rigoureuse des paramètres morphologiques et physiologiques.

À la fin de la première saison de croissance (tableaux 2.1 et 2.6), les effets de l'azote et du cuivre sur les concentrations en éléments nutritifs dans les tissus étaient très nets. L'usage des différents niveaux de fertilisation azotée, prévus pour contrebalancer les effets du cuivre sur la croissance des plants, a affecté essentiellement l'accumulation de l'azote dans les tissus (tiges et racines); cette accumulation, fortement prévisible, a grandement influencé la morphologie des plants (chapitre premier). Le cuivre, en fonction de son degré de concentration, affecte différemment celle des autres éléments nutritifs. Par exemple, à un niveau de 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$ , les teneurs en phosphore (tiges et racines) et en potassium (racines) étaient beaucoup plus faibles que celles des témoins. À 50 g/l cependant, les effets étaient déjà beaucoup moins importants, tandis que pour le *Trimroot 112*, la teneur en phosphore (racines) était même plus élevée chez les plants traités au cuivre. Ceci laisse supposer la présence d'un taux de concentration de  $\text{CuCO}_3$  qui aurait peu d'effet sur celle des autres éléments nutritifs. Ce taux ne peut être établi de façon précise, en raison de notre méconnaissance du degré exact de concentration du cuivre appliqué par la compagnie Beaver Plastics Ltd. (en instance de brevet). Pour ce qui est de l'accumulation des réserves en amidon (tiges et racines), elle est proportionnelle à la fertilisation reçue et elle est

sensible, pour ce qui est des racines, aux traitements au cuivre. Comme on a pu l'observer avec certains éléments nutritifs, les concentrations en amidon dans les tissus diminuent à 50 et 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$  et augmentent pour les plants traités dans le *Trimroot 112*. Même si le cuivre a modifié les diverses concentrations, aucune carence notable n'a été observée. Seule la teneur en azote dans les tissus, sous la régie N1, était faible.

Les concentrations en azote dans les tissus des tiges et des racines étaient, au cours de la deuxième année, directement proportionnelles à la quantité d'azote reçue (figures 2.2 et 2.8, tableaux 2.3 et 2.8). Des carences en azote étaient toutefois perceptibles sous la régie nutritionnelle N1 et la couleur des plants a été plutôt jaunâtre tout au long de la saison. La concentration en cuivre dans les racines est très fortement affectée par les traitements au  $\text{CuCO}_3$  (figures 2.3 et 2.9), tandis qu'aucun effet notable n'est observé dans les tiges. Le cuivre est donc très peu transféré vers les parties aériennes et n'a pas présenté de symptôme de toxicité apparent pour les tiges et les racines. Les mêmes observations ont été effectuées par SAUR (1990a et 1991) sur le *Pinus pinaster* Soland *in Ait.* Aucune déformation de la tige n'a été observée par suite de carences en cuivre comme celles que DOWNES et TURVEY (1990) ont reconnues sur le *Pinus radiata* D. Don. Les travaux de GONZALES et ESCOBAR (1987) sur des plantules de *P. radiata* ont démontré que le cuivre pouvait être transféré vers les aiguilles sans toutefois présenter de symptômes de toxicité. Le comportement du phosphore dans les racines (figures 2.4 et 2.10) démontre très bien les différents effets du cuivre, en fonction de son degré de concentration (traitements au  $\text{CuCO}_3$ ). L'effet du cuivre est négatif à 100 g/l, de moitié moindre à 50 g/l et il est positif avec les plants cultivés dans le *Trimroot 112* traité (tableaux 2.3 et 2.8). Cependant, aucune carence notable n'a été observée pour le phosphore, même à 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$ . Selon LAMBERT et WEIDENSAUL (1982), un apport supplémentaire en cuivre est généralement nécessaire à la culture des conifères en récipient. Même si Beaver Plastics Ltd. refuse de faire connaître la nature de son produit et son degré de concentration, on peut supposer que celui-ci consiste en du carbonate de cuivre ( $\text{CuCO}_3$ ), appliqué par bandes à un degré de concentration voisin de 50 à 100 g/l. Des essais entrepris au printemps 1991 par le ministère des Forêts du Québec (LANGLOIS et GINGRAS), avec des récipients de 200 cm<sup>3</sup> soumis à des traitements au cuivre par bandes alternées (style *Trimroot*) à une concentration de 50 g/l de  $\text{CuCO}_3$ , laissent entrevoir très peu d'effets négatifs sur les plants (morphologie et physiologie) tout en permettant un cernage racinaire efficace.

Tous les autres éléments nutritifs (azote, potassium, calcium, magnésium et manganèse) sont également influencés par le cuivre à différents niveaux. Plusieurs différences observées dans les concentrations en éléments nutritifs dans les tissus correspondent à celles constatées pour la fertilité du substrat (chapitre premier). Dans la grande majorité des cas, les effets à 50 g/l sont de moitié inférieurs à ceux obtenus à 100 g/l et très faibles avec le *Trimroot 112*. Les travaux de SAUR (1989 et 1990d) ainsi que de SAUR et GOMEZ (1989) démontrent la complexité des interactions liées à l'absorption et aux transferts des éléments nutritifs dans les plants : rétention par la matière organique, rôle des exsudats racinaires et des micro-organismes, accumulation et transferts dans la plante, etc.

La recherche entreprise ne permet pas de préciser quels seront les effets des différentes concentrations de chaque élément dans les tissus sur le comportement des plants en plantation. Cependant, on peut dégager une règle générale : utiliser une concentration en  $\text{CuCO}_3$  minimale permettant un cernage racinaire efficace qui a le moins d'effet que possible sur les différentes concentrations. L'avantage du traitement par bandes, déjà précisé au chapitre premier, apparaît ici très évident et il est maintenant recommandé pour tous les essais à venir. Un traitement complet de la cavité, à une concentration de 100 g/l de  $\text{CuCO}_3$ , est totalement déconseillé.

L'usage de traitements au cuivre influence favorablement les concentrations en sucres solubles dans les tiges et de façon négative, les concentrations dans les racines dans le récipient 45-110. Cependant, à 50 g/l, les effets sont beaucoup moins importants qu'à 100 g/l (tableau 2.4). Pour ce qui est de l'accumulation des glucides, on n'a observé qu'un minimum d'effets négatifs en utilisant le récipient *Trimroot 112* ; plusieurs sucres présentaient même des concentrations plus élevées chez les plants traités au cuivre (tableau 2.9). Les tiges constituent la plus grande partie des réserves en glucides (concentration et contenu). Les concentrations en sucres solubles dans les tissus étaient très peu affectées par les diverses régies nutritionnelles, tandis que l'accumulation de l'amidon est, quant à elle, sensible aux différentes doses de cuivre et d'azote. L'usage de récipients traités au cuivre (50 g/l pour le 45-110 ou le *Trimroot 112* traité) ne semble pas avoir d'incidence néfaste trop importante sur les concentrations en glucides et en amidon. Cependant, compte tenu des connaissances actuelles sur le rôle et l'importance relative des différents sucres et de l'amidon dans les divers processus physiologiques, il apparaît très sage de retenir le traitement au cuivre qui en affectera le moins possible les concentrations : le *Trimroot 112* traité.

Les regroupements de blocs, effectués pour les analyses de concentration, n'ont eu d'incidence négative que sur la capacité d'effectuer des analyses statistiques rigoureuses et d'ajouter aux graphiques les intervalles de confiance de la moyenne. Les résultats ont quand même permis de faire ressortir, de façon très nette, les effets des traitements sur les concentrations d'éléments dans les tissus des plants. Cependant, si cette expérience était reprise, trois solutions devraient alors être envisagées pour corriger ces lacunes : considérer tous les blocs (si possible), sélectionner au hasard seulement quatre blocs pour les analyses, ou bâtir un dispositif qui compte quatre blocs. La solution idéale consiste à établir un dispositif expérimental qui comporte un nombre de blocs identique à celui du nombre d'analyses pouvant être réalisées pour un traitement. Il est toujours souhaitable d'avoir un nombre égal de répétitions (blocs) pour l'ensemble des paramètres évalués, principalement pour les analyses de corrélation et de régression. De plus, aucune interaction régie nutritionnelle/traitement n'a été observée dans les analyses des tests de C.C.R. (tableaux 2.5 et 2.10).

Le test de capacité de croissance racinaire (C.C.R.) était considéré, jusqu'à tout récemment, comme un test final pouvant servir à lui seul à évaluer la performance des plants en plantation. Les récents travaux de MATTSSON (1986), BURDETT (1987), SUTTON (1987, 1990), SIMPSON *et al.* (1988), BINDER *et al.* (1988) et LANDIS et SKAKEL (1989) ont apporté beaucoup de précisions quant à l'importance de ce test, le moment de le réaliser, les paramètres à évaluer et l'interprétation de ses résultats. Le test de C.C.R. est maintenant considéré comme un test physiologique d'évaluation des semis qui doit être intégré à d'autres tests de qualification des plants. Le test de C.C.R. a été considéré dans cette étude comme un critère d'évaluation de la santé générale des plants et, principalement, comme un moyen d'évaluer le développement racinaire (architecture) des plants soustraits aux traitements au cuivre. Les conditions culturelles retenues pour ces tests se sont avérées très adéquates et sont recommandées pour les essais à venir (Annexe C).

Une concentration élevée en azote dans les tissus (tiges et racines) affecte directement le rendement des plants lors des tests de C.C.R. (tableaux 2.5 et 2.10), le nombre et la masse des nouvelles racines blanches de plus de 1 cm étant plus élevés. Le traitement au cuivre à 100 g/l a une incidence trop négative sur la C.C.R. et il est déconseillé. Même si les résultats pour le 50 g/l ne présentaient pas de différences significatives avec les témoins, il n'en reste pas moins que l'architecture du système racinaire produit laisse

fortement à désirer. Les racines inhibées semblent éprouver énormément de difficulté à reprendre leur croissance, une fois qu'elles ne sont plus soumises à l'action du cuivre. Ceci contredit le caractère temporaire de l'inhibition avancé par quelques auteurs (BURDETT et MARTIN 1982; McDONALD et al. 1984a, 1984b). Le nouveau système racinaire (figure 2.7) ne présente pas une reprise de la croissance à tous les niveaux, comme on pouvait l'espérer avec les traitements au cuivre. La durée de culture (deux saisons) ou une concentration trop élevée en cuivre pourrait expliquer le caractère beaucoup plus permanent de l'inhibition. Les plants produits dans le *Trimroot 112* possédaient, quant à eux, une C.C.R. nettement plus élevée lorsqu'ils avaient été traités au cuivre. De plus, leur système racinaire (figure 2.13) était comparable à celui d'un semis naturellement établi. Dans le cas de la C.C.R., comme pour les analyses des concentrations, le récipient *Trimroot 112* s'est avéré le plus efficace. Indépendamment de la valeur réelle des tests de C.C.R. et de l'interprétation que l'on peut accorder aux résultats, un plant qui possède un développement racinaire semblable à celui des *Trimroot 112* traités au cuivre, ne peut que bien se développer en pleine terre et posséder un ancrage idéal au sol. De plus, un tel système racinaire est à même d'explorer un très grand volume de sol, tôt en plantation, ce qui est essentiel pour la survie des plants. Le développement racinaire est le facteur clef du succès d'une plantation (BURDETT 1990) : interdépendance entre la photosynthèse et la croissance racinaire.

L'analyse des concentrations en éléments nutritifs, glucides et amidon dans les tissus ainsi que l'évaluation de la capacité de croissance racinaire des plants a permis une évaluation plus complète que ne le font les études conventionnelles. Qu'il s'agisse de l'évaluation d'un lot de plants ou de la mesure des effets d'un traitement, la qualification intégrée permet de couvrir un plus vaste champ de paramètres et d'ainsi mieux connaître les plants produits. La qualification intégrée des plants ne se borne pas à une évaluation complète en fin de culture. L'historique de la culture et les caractéristiques des sites de reboisement demeurent des facteurs extrêmement importants (GROSSNICKLE *et al.* 1988; BINDER *et al.* 1988; DEANS *et al.* 1990). Les plants produits dans cette étude sont actuellement en plantation comparative (dispositifs expérimentaux comprenant plusieurs traitements) depuis le printemps 1991 et feront l'objet d'observations durant les prochaines années (1991-1993).

L'objectif de cette étude a donc été atteint : évaluer les effets des traitements à l'azote et au cuivre sur la physiologie des plants et sur leur capacité de croissance racinaire. Les résultats permettent aussi de préciser la concentration de cuivre et le niveau azoté à recommander : récipient *Trimroot 112* traité au cuivre soumis à la régie N2 (12,2 mg N en 1+0 et 39,0 mg N en 2+0). Pour d'éventuels essais de cernage racinaire d'essences résineuses, on recommande l'emploi du  $\text{CuCO}_3$ , à un point de concentration de 50 g/l appliqué par bandes alternées. Les résultats présentés dans ce chapitre sont en accord total avec ceux qui ont trait à la morphologie (chapitre précédent). À ce stade-ci de la recherche, les résultats laissent entrevoir un potentiel très intéressant pour ces plants sur le terrain; cependant, la sagesse est de mise. Le comportement de ces semis en plantation devra être connu avant de prescrire des traitements opérationnels aux producteurs de plants (conclusion du chapitre premier). De plus, considérant que l'eau est un facteur très restrictif pour les semis forestiers, une évaluation des relations hydriques en plantation serait importante afin de préciser d'éventuels effets limitatifs dûs au cuivre.

Si les problèmes de stabilité et de reprise en plantation persistent, l'utilisation de récipients à parois ajourées, permettant le cernage aérien des racines, est une avenue plus simple et plus écologique à explorer. Des plants d'épinette noire, cultivés dans ce type de récipient (LANGLOIS et GINGRAS 1990, non publié), étaient très équilibrés, présentaient une structure racinaire horizontale et possédaient une excellente capacité de croissance racinaire : jusqu'à 145 nouvelles racines blanches de plus de 1 cm, réparties de façon uniforme autour de la carotte à toutes les hauteurs.

## Conclusion générale et perspectives d'avenir

La présente étude a démontré qu'il est possible de produire des semis d'épinette noire, morphologiquement et physiologiquement équilibrés, possédant une structure racinaire horizontale et une capacité de croissance racinaire élevée, qui respectent les standards de qualification. Les expérimentations conduites permettent de dégager les grandes lignes suivantes:

- le carbonate de cuivre ( $\text{CuCO}_3$ ) permet de modifier de façon très substantielle l'architecture racinaire, en créant à l'intérieur de la cavité une structure horizontale semblable à celle des semis naturellement établis;
- un taux de concentration maximal de 50 g/l de  $\text{CuCO}_3$  doit être utilisé pour d'éventuels traitements;
- le traitement par bandes verticales alternées permet de produire des plants chez qui la motte racinaire se tient fermement, ce qui est très important pour les opérations de reboisement. De plus, cette technique permet de réduire d'une façon considérable les effets du cuivre sur la morphologie et la physiologie (éléments nutritifs, glucides et amidon) des plants;
- une nutrition minérale adéquate assure la production de plants équilibrés;
- les tests de capacité de croissance racinaire laissent entrevoir un excellent potentiel pour les plants produits dans le *Trimroot 112* traité au cuivre, et leur développement racinaire en plantation devrait être similaire aux semis naturellement établis.

Même si l'objectif de production a été atteint, les résultats très prometteurs obtenus doivent d'abord et avant tout être corroborés par des travaux en plantations de qualification durant plusieurs années. En effet, seule une évaluation rigoureuse du développement racinaire, des taux de survie et d'accroissement annuels, permettront de compléter l'évaluation globale des plants telle que prévue dans le cadre d'une qualification intégrée. Le rendement des plants en plantation devra être nettement supérieur, afin de justifier les coûts additionnels et les inconvénients de production inhérents à l'usage du carbonate de cuivre. Malheureusement, au moment d'écrire ces lignes, aucun résultat du moins à notre connaissance n'a été publié par les auteurs cités dans cette étude sur le comportement des plants en plantation. La technique du cernage chimique est actuellement utilisée dans certaines provinces du Canada et dans certains pays pour des productions résineuses et feuillues en récipient.

En plus de démontrer l'efficacité du cernage chimique pour l'épinette noire, cette étude a permis de préciser un peu plus l'importance de la qualification intégrée des plants. Plusieurs auteurs insistent sur ce concept et proposent plusieurs autres tests physiologiques pour une évaluation, la plus adéquate que possible, des plants destinés au reboisement. Selon cette approche, les délais de diffusion des résultats sont considérablement augmentés (2 à 3 années), mais n'est-ce pas le *prix raisonnable* à payer avant de prescrire à gauche et à droite des traitements qui pourraient s'avérer inutiles ou catastrophiques sur la terrain ?

À ce stade-ci des recherches, voici quelques interrogations destinées à faire le point et à orienter les recherches dans ce champ d'activité.

- Quel est, en 1991, le constat que l'on peut tirer du rendement (stabilité, survie et croissance) des plantations établies depuis 1984 ?
- Ce rendement est-il affecté de façon majeure par les malformations racinaires inhérentes à la production en récipient, ou n'y a-t-il pas d'autres facteurs (historique de la culture, portrait des sites de reboisement, essences de reboisement, etc.) qui ont été malheureusement négligés à ce jour ?
- Peut-on justifier l'utilisation en pépinière d'un produit toxique, très coûteux, et qui demande d'être appliqué tous les deux ans, malgré une efficacité clairement démontrée ?
- Ne peut-on pas envisager l'utilisation de récipients à parois ajourées pour produire, de façon naturelle, des semis munis de systèmes racinaires horizontaux ?
- L'utilisation de régulateurs de croissance pourrait-elle permettre la production d'un système racinaire plus adéquat ?
- Les gestionnaires travaillant dans le secteur de la production de plants sont-ils prêts à admettre le ou les problèmes, à soutenir les recherches et à attendre les délais nécessaires pour obtenir des résultats sur le terrain ?

La réponse à ces questions exige un inventaire ponctuel et rigoureux des plantations établies jusqu'à ce jour (programme québécois de reboisement et essais expérimentaux). Cet exercice permettrait de faire le point sur la question de la stabilité des plants en plantation et sur ce qui fait problème en ce domaine, afin d'intensifier les recherches sur les malformations racinaires ou sur d'autres causes possibles d'altération. Compte tenu des pressions qu'exercent les mouvements environnementalistes, il serait sage de prévoir un substitut au cuivre.

Cette étude aura donc permis d'améliorer un peu nos connaissances sur la production de plants et ainsi d'enrichir le potentiel forestier du Québec, qui est notre plus belle richesse.

## Liste des ouvrages cités

- ARNOLD, M.A. et D.K. STRUVE, 1989a. *Growing green ash and red oak in CuCO<sub>3</sub>-treated containers increases root regeneration and shoot growth following transplant.* J. Amer. Soc. Hort. Sci. 114(3) : 402-406.
- ARNOLD, M.A. et D.K. STRUVE, 1989b. *Cupric carbonate controls green ash root morphology and root growth.* Hort. Science 24(2) : 262-264.
- BINDER, W.D., R.K. SCAGEL et G.J. KRUMLIK, 1988. *Root growth potential: Facts, myths, values ?* USDA Forest Service General Technical Report RM-167 : 111-118.
- BURDETT, A.N., 1978. *Control of root morphogenesis for improved mechanical stability in container-grown lodgepole pine.* Can. J. For. Res. 8 : 483-486.
- BURDETT, A.N., 1982. *Box-pruning the roots of container-grown tree seedlings.* Canadian Containerized Tree Seedling Symposium, 14-16 Sept. 1981 : 203-207.
- BURDETT, A.N., 1987. *Understanding root growth capacity: theoretical considerations in assessing planting stock quality by means of root growth tests.* Can. J. For. Res. 17 : 768-775.
- BURDETT, A.N., 1990. *Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock.* Can. J. For. Res. 20 : 415-427.

- BURDETT, A.N. et P.A.F. MARTIN, 1982. *Chemical root pruning of coniferous seedlings*. Hort. Sci. 17(4) : 622-624.
- BURDETT, A.N., D.G. SIMPSON et C.F. THOMPSON, 1983. *Root development and plantation establishment success*. Plant and Soil 71 : 103-110.
- BURDETT, A.N., H. COATES, R. EREMKO et P.A.F. MARTIN, 1986. *Toppling in British Columbia's lodgepole pine plantations: Significance, cause and prevention*. The Forestry Chronicle 62 : 433-439.
- COCHRAN, W.G., 1977. *Sampling techniques. Third edition*. John Wiley & Sons, New-York. 428 p.
- COUTTS, M.P. et G.J. LEWIS, 1983. *When is the structural root system determined in the Sitka spruce ?* Plant and Soil 71 : 155-160.
- DEANS, J.D., C. LUNDBERG, M.G.R. CANNELL, M.B. MURRAY et L.J. SHEPPARD, 1990. *Root system fibrosity of Sitka spruce transplants: relationship with root growth potential*. Forestry 63(1) : 1-7.
- DOWNES, G.M. et N.D. TURVEY, 1991. *The effect of nitrogen and copper on characteristics of wood tissue in Pinus radiata*. Can. J. For. Res. 20 : 1369-1377.
- GILMAN, E.F., 1990a. *Tree root growth and development. I. Form, spread, depth and periodicity*. J. Environ. Hort. 8(4) : 215-220.
- GILMAN, E.F., 1990b. *Tree root growth and development. II. Response to culture, management and planting*. J. Environ. Hort. 8(4) : 220-227.
- GONZALEZ, C. et R. ESCOBAR, 1987. *Pinus radiata D. Don in Chile. Fertilization trials with copper*. Plant and Soil 97 : 217-222.
- GROSSNICKLE, S.C., J.T. ARNOTT et J.E. MAJOR, 1988. *A stock quality assessment procedure for characterizing nursery-grown seedlings*. USDA Forest Service, General Technical Report RM-167 : 77-88.
- HOCKING, D., 1972. *Copper toxicity in container seedlings in copper-bottomed flats*. Can. For. Serv. Bi-Monthly Res. Notes 28(4) : 26.
- HUNT, G.A., 1990. *Effect of styroblock design and copper treatment on morphology of conifer seedlings*. Paper presented at the Western Forest Nursery Council 1990 Conference : 218-222.
- LAMBERT, D.H. et T.C. WEIDENSAUL, 1982. *Copper requirements of container-grown conifer seedlings*. Can. J. For. Res. 12 : 848-852.
- LANDIS, T.D. et S.G. SKAKEL, 1988. *Root growth potential as an indicator of outplanting performance: problems and perspectives*. USDA Forest Service, General Technical Report RM-167 : 106-110.
- LANGLOIS, C.-G., 1980. *L'importance de l'arbre souterrain*. Forêt Conservation 46(9) : 12-16.
- LANGLOIS, C.-G., 1983. *Notes sur la fertilisation des plants cultivés en récipients*. Min. de l'Énergie et des Ress., Division des pépinières, Pub. 1-616. 52 p.
- LANGLOIS, C.-G., 1990a. *Besoin hebdomadaire total en azote des épinettes noire et blanche 1+0 et 2+0 en récipient* 45-110. Ministère des Forêts du Québec. 16 p.
- LANGLOIS, C.-G., 1990b. *Besoins structuraux en azote, phosphore et potassium des épinettes noire et blanche 1+0 et 2+0 en récipient* 45-110. Ministère des Forêts du Québec. 16 p.
- LIVINGSTON, W.H. et S. MAYNARD, 1988. *Ethylene treatments of conifer seedlings to improve root form*. Forest Pathology Research, University of Maine. 3 p.
- LOESCHER, W.H., T. MCCAMANT et J.D. KELLER, 1990. *Carbohydrate reserves, translocation and storage in woody plant roots*. Hort. Science 25(3) : 274-281.
- MATTSSON, A., 1986. *Seasonal variation in root growth capacity during cultivation of container grown Pinus sylvestris seedlings*. Scand. J. For. Res. 1 : 473-482.
- MCDONALD, S.E., R.W. TINUS et C.P.P. REID, 1984a. *Modification of ponderosa pine root systems in containers*. J. Environ. Hort. 2(1) : 1-5.

- McDONALD, S.E., R.W. TINUS, C.P.P. REID et S.C. GROSSNICKLE, 1984b. *Effect of CuCO<sub>3</sub> container wall treatment and mycorrhizae fungi inoculation of growing medium on pine seedling growth and root development*. J. Environ. Hort. 2(1) : 5-8.
- MEXTAL, J. et S. BURTON, 1978. *Root development of planted loblolly pine seedlings. In proceedings of the root form of planted trees symposium*. Can. For. Serv., Joint Rep. No. 8 : 85-90.
- PHILIPSON, J.J., 1988. *Root growth in Sitka spruce and Douglas fir transplants : dependance on the shoot and stored carbohydrates*. Tree Physiology 4 : 101-108.
- RUEHLE, J.L., 1985. *The effect of cupric carbonate on root morphology of containerized mycorrhizal pine seedlings*. Can. J. For. Res. 15 : 586-592.
- SAS INSTITUTE INC., 1985. *SAS User's Guide: Basics, 5<sup>th</sup> ed.* SAS Institute Inc., Cary, NC. 1290 p.
- SAS INSTITUTE INC., 1985. *SAS User's Guide: Statistics, 5<sup>th</sup> ed.* SAS Institute Inc., Cary, NC. 956 p.
- SAUR, E., 1989. *Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-éléments (Cu, Mn, Zn, B) à trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de Pinus pinaster Soland in Ait. 1. Croissance et nutrition en éléments majeurs*. Agronomie 9 : 931-940.
- SAUR, E., 1990a. *Influence d'une fertilisation cuprique et phosphatée sur la croissance et la nutrition minérale du pin maritime (Pinus pinaster Soland in Ait.) en sol sableux riche en matière organique*. Ann. Sci. For. 47 : 67-74.
- SAUR, E., 1990b. *Mise au point bibliographique, au sujet de la nutrition oligo-minérale des plantes supérieures. Carences et toxicité chez les conifères*. Ann. Sci. For. 47 : 367-389.
- SAUR, E., 1990c. *Étude expérimentale de l'influence de la fertilisation phosphatée sur le prélèvement en cuivre par Pinus pinaster Soland in Ait.* Acta Oecologica 11(5) : 701-717.
- SAUR, E., 1990d. *Effet de l'apport de phosphore, de carbonate de calcium et d'oligo-éléments (Cu, Mn, Zn, B) à trois sols sableux acides sur la croissance et la nutrition de semis de Pinus pinaster Soland in Ait. 2. Nutrition en oligo-éléments*. Agronomie 10 : 23-28.
- SAUR, E., 1991. *Conséquences de l'absorption foliaire de cuivre sur la croissance pondérale et la nutrition minérale de semis de Pinus pinaster Soland in Ait.* C. R. Acad. Sci. Paris, t. 313, série III : 87-91.
- SAUR, E. et A. GOMEZ, 1989. *Influence de l'activité rhizosphérique du pin maritime (Pinus pinaster Soland in Ait.) sur les teneurs du sol en cuivre soluble à l'eau*. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, série III : 465-470.
- SHEEDY, G., 1991. *La stabilité des plants en contenants : qu'en est-il exactement ?* Ministère des Forêts du Québec, Direction de la recherche. Note de recherche forestière n° 45. 16 p.
- SIMPSON, D.G., A. VYSE et C.F. THOMPSON, 1988. *Root growth capacity effects on field performance*. USDA Forest Service, General Technical Report RM-167 : 119-121.
- STEEL, R.G.D. et J.H. TORRIE, 1980. *Principles and procedures of statistics - A biometrical approach. 2<sup>nd</sup> ed.* McGraw-Hill, New-York. 633 p.
- STEIN, W.I., 1978. *Naturally developed seedling roots of five western conifers*. Can. For. Serv., Joint. Rep. No. 8 : 28-35.
- SUTTON, R.F., 1987. *Root growth capacity and field performance of jack pine and black spruce in boreal stand establishment in Ontario*. Can. J. For. Res. 17 : 794-804.
- SUTTON, R.F., 1990. *Root growth capacity in coniferous forest trees*. Hort. Science 25(3) : 259-266.
- SUTTON, R.F. et R.W. TINUS, 1983. *Root and root system terminology*. Forest Science, Monograph 24. 137 p.
- VAN DEN DRIESSCHE, R., 1987. *Importance of current photosynthate to new root growth in planted conifer seedlings*. Can. J. For. Res. 17 : 776-782.
- VEILLEUX, L., D. ST-ARNEAULT, S. MERCIER et G. LAMBANY, 1992. *Techniques d'analyse des composés physiologiques employés dans la Division de R-D sur les semences, boutures et plants. Guide d'utilisation (revu et augmenté)*. Ministère des Forêts, Dir. de la rech. (Document de travail à distribution restreinte). 30 p.



## **Annexes**



## Annexe A — Calendriers de fertilisation

### 1 - Multipot 45-110 - saison 1989

Date	n°	Formulation	Azote						Phosphore		Potassium	
			N1		N2		N3		mg/cav	ppm	mg/cav	ppm
			mg/cav*	ppm	mg/cav	ppm	mg/cav	ppm				
06/28	1	10-52-10 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,35	123	1,35	123	1,35	123	3,07	279	1,12	102
07/05	2	10-52-10 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,26	115	1,26	115	1,26	115	2,86	260	1,05	95
07/11	3	8-20-30 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,50	45	0,50 0,60	45 55	0,50 1,20	45 109	0,54	49	1,56	141
07/19	4	8-20-30 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,60	55	0,60 0,60	55 55	0,60 1,20	55 109	0,65	59	1,87	170
07/26	5	20-20-20 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,60	55	0,60 0,60	55 55	0,60 1,20	55 109	0,26	24	0,50	45
08/02	6	20-20-20 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,80	73	0,80 0,60	73 55	0,80 1,20	73 109	0,35	32	0,66	60
08/08	7	20-20-20 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,80	73	0,80 0,60	73 55	0,80 1,20	73 109	0,35	32	0,66	60
08/15	8	20-20-20 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,80	73	0,80 0,60	73 55	0,80 1,20	73 109	0,35	32	0,66	60
08/22	9	10-52-10 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,00	91	1,00 1,00	91 91	1,00 2,00	91 182	2,27	206	0,83	75
08/29	10	---										
09/05	11	---										
09/12	12	---										
09/22	13	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,50	45	0,50	45	0,50	45				
09/27	14	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0,50	45	0,50	45	0,50	45				
			8,71	793	13,31	1214	17,91	1629	10,70	973	8,91	808

\* mg/cav = milligrammes par cavité. L'équivalent pour le *Trimroot* s'obtient en multipliant par 0,915.

## Annexe a (suite)

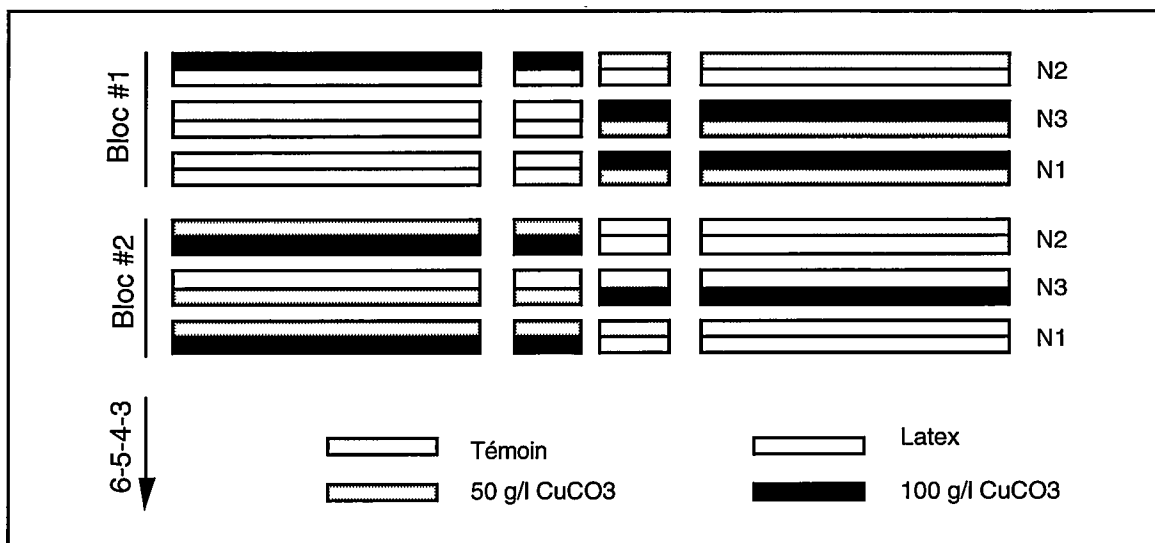
### 2 - Multipot 45-110 - saison 1990

Date	n°	Formulation	Azote						Phosphore		Potassium	
			N1		N2		N3		mg/cav	ppm	mg/cav	ppm
			mg/cav*	ppm	mg/cav	ppm	mg/cav	ppm				
05/04	1	15-30-15 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	3,10	282	3,10	282	3,10	282	2,71	246	2,57	234
05/10	2	15-30-15 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,57	143	1,57	143	1,57	143	1,37	125	1,30	118
05/15	3	10-52-10 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,77	161	1,77	161	1,77	161	4,02	365	1,47	134
05/25	4	8-20-30 34-00-00	1,92	175	1,92	175	1,92	175	2,09	190	5,98	544
05/31	5	20-20-20 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,79	163	1,79	163	1,79	163	0,78	71	1,49	135
06/05	6	20-20-20 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,91	174	1,91	174	1,91	174	0,83	75	1,59	145
06/11	7	20-20-20 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,89	172	1,89	172	1,89	172	0,82	75	1,57	143
06/20	8	15-30-15 NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1,94	176	1,94	176	1,94	176	1,69	154	1,61	146
06/26	9	34-00-00 34-00-00	1,95	177	1,95	177	1,95	177				
07/03	10	34-00-00 34-00-00	1,94	176	1,94	176	1,94	176				
07/11	11	15-30-15 34-00-00	1,82	165	1,82	165	1,82	165	1,59	145	1,51	137
07/17	12	20-20-20 34-00-00	1,77	161	1,77	161	1,77	161	0,77	70	1,47	134
07/24	13	20-20-20 34-00-00	1,73	157	1,73	157	1,73	157	0,75	68	1,44	131
07/30	14	—										
08/06	15	—										
08/13	16	—										
08/20	17	—										
08/28	18	8-20-30 34-00-00	1,21	110	1,21	110	1,21	110	1,32	120	3,77	343
09/05	19	20-20-20 34-00-00	1,08	98	1,08	98	1,08	98	0,47	43	0,90	827
09/14	20	8-20-30 34-00-00	1,18	107	1,18	107	1,18	107	1,29	117	3,67	334
09/18	21	20-20-20 34-00-00	0,89	81	0,89	81	0,89	81	0,39	35	0,74	67
09/24	22	20-20-20 34-00-00	0,82	75	0,82	75	0,82	75	0,36	33	0,68	62
10/01	23	34-00-00 34-00-00	0,94	85	0,94	85	0,94	85				
10/10	24	34-00-00 34-00-00	0,86	78	0,86	78	0,86	78				
					0,31	28	0,63	57				
			32,08	2916	42,63	3875	53,20	4836	21,25	1932	31,76	2887

\* mg/cav = milligrammes par cavité. L'équivalent pour le *Trimroot* s'obtient en multipliant par 0,915.

## Annexe B — Plan des dispositifs expérimentaux et modèles statistiques

### 1 - Multipot 45-110

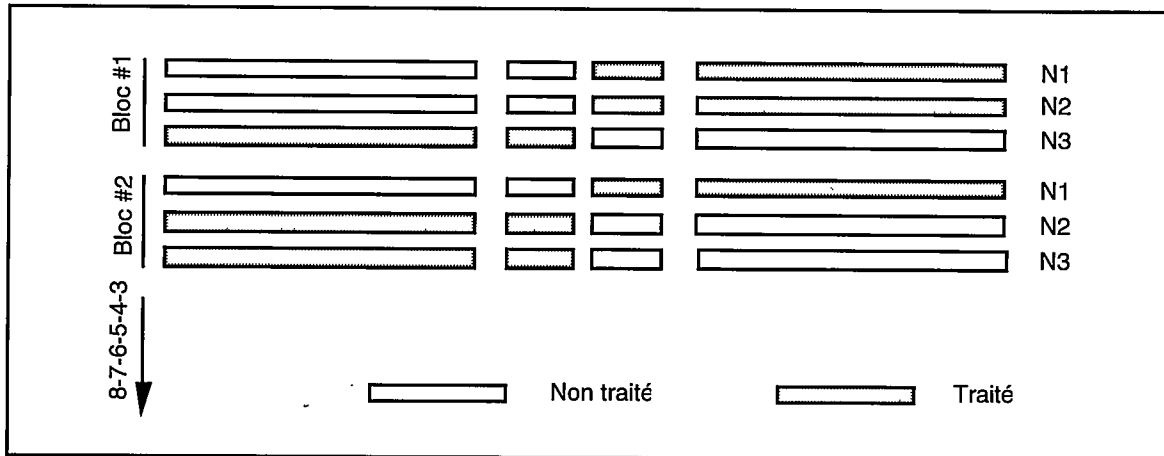


<u>Source</u>	<u>DI</u>	
Bloc	5	B-1
N	2	R-1
Erreur exp. #1	10	(B-1)(N-1)
T	3	T-1
N*T	6	(N-1)(T-1)
Erreur exp. #2	45	(B-1)[(T-1)+(N-1)(T-1)]
Erreur échantillonnale	792	BNT(n-1)
Total	863	BNTn-1

- B - Bloc
- N - Régie nutritionnelle
- T - Traitements au cuivre
- n - Unités échantillonnales par bloc (12)

Annexe B (suite)

2 - Trimroot 112



<u>Source</u>	<u>DI</u>	
Bloc	7	B-1
N	2	R-1
Erreur exp. #1	14	(B-1)(N-1)
T	1	T-1
N*T	2	(N-1)(T-1)
Erreur exp. #2	21	(B-1)[(T-1)+(N-1)(T-1)]
Erreur échantillonnale	384	BNT(n-1)
Total	431	BNTn-1

- B - Bloc
- N - Régie nutritionnelle
- T - Traitements (témoin - cuivre)
- n - Unités échantillonnales par bloc (9)

### Annexe C — Conditions culturelles des tests de capacité de croissance racinaire

Date	n°	Jour	Température		Heures de lumière	Activités
			min	max		
10/30	0	Ma				Inventaire à la pépinière de Grandes-Piles
10/31	1	Me	<	<	***	Début de la période de deux semaines d'acclimatation
11/01	2	Je	<	<	***	Sans chauffage, $T_{\min}$ env. 8 °C et $T_{\max}$ env. 14 °C
11/02	3	Ve	<	<	***	Irrigation au besoin seulement (% H = 50-60)
11/03	4	Sa	<	<	***	
11/04	5	Di	<	<	8	Éclairage artificiel de 8 h à 16 h
11/05	6	Lu	<	<	9	Éclairage artificiel de 7:30 h à 16:30 h
11/06	7	Ma	9	14	10	Éclairage artificiel de 7 h à 17 h
11/07	8	Me	10	15	11	Éclairage artificiel de 6:30 h à 17:30 h
11/08	9	Je	11	16	12	Éclairage artificiel de 6 h à 18 h
11/09	10	Ve	12	17	13	Éclairage artificiel de 5:30 h à 18:30 h
11/10	11	Sa	13	18	14	Éclairage artificiel de 5 h à 19 h
11/11	12	Di	14	19	15	Éclairage artificiel de 5 h à 20 h
11/12	1	Lu	15	20	16	Début du test de C.C.R. (conditions optimales)
11/13	2	Ma	15	20	16	Éclairage artificiel de 5 h à 21 h
11/14	3	Me	15	20	16	Irrigation au besoin seulement (% H = 50-60)
11/15	4	Je	15	20	16	
11/16	5	Ve	15	20	16	
11/17	6	Sa	15	20	16	
11/18	7	Di	15	20	16	
11/19	8	Lu	15	20	16	
11/20	9	Ma	15	20	16	
11/21	10	Me	15	20	16	
11/22	11	Je	15	20	16	
11/23	12	Ve	15	20	16	
11/24	13	Sa	15	20	16	
11/25	14	Di	15	20	16	
11/26	15	Lu	15	20	16	
11/27	16	Ma	15	20	16	
11/28	17	Me	15	20	16	
11/29	18	Je	15	20	16	
11/30	19	Ve	15	20	16	
12/01	20	Sa	15	20	16	
12/02	21	Di	15	20	16	Fin du test de C.C.R.
12/03	1	Lu	15	20	16	Extraction des plants et décompte des racines
12/04	2	Ma	15	20	16	
12/05	3	Me	15	20	16	
12/06	4	Je	15	20	16	
12/07	5	Ve	15	20	16	





Pour rencontrer ses objectifs de reboisement, le ministère des Ressources naturelles doit s'assurer que l'on met bien tout en oeuvre pour produire et mettre en terre des semis de qualité qui possèdent une grande rapidité d'installation et d'adaptation. Les recherches entreprises par le Ministère sur le contrôle des malformations des racines, la nutrition minérale et le choix d'un bon récipient constituent des éléments essentiels à la production de semis de qualité supérieure. Ces travaux et ceux que l'on mène actuellement sur la production de plants de fortes dimensions dans des récipients à parois ajourées vont permettre d'accroître le rendement des futures plantations.

