

Optimisation des principales techniques culturales affectant l'architecture des racines et la qualité des plants produits en pépinière forestière

Mohammed S. Lamhamedi, agr., ing.f, M.Sc., Ph.D.

mohammed.lamhamedi@mrfn.gouv.qc.ca

**Direction de la recherche forestière (DRF)
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune**

**Journée des producteurs en pépinière
Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale
1^{er} février 2007, Hôtel le Dauphin, Drummondville, Québec, Canada**

La direction de la recherche forestière : mandats

- Réaliser des travaux de R-D, principalement à long terme et d'envergure provinciale, lesquels intègrent à la fois des préoccupations de recherche fondamentale et de recherche appliquée;
- Subventionner des recherches universitaires de court et de moyen terme, complémentaires aux travaux de la DRF ou réalisées dans des créneaux où elle ne peut s'impliquer;
- Diffuser de nouvelles connaissances et fournir les avis et les conseils scientifiques.

Direction de la recherche forestière

- 2006 : 85 projets de recherche actifs.

<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche/repertoires/connaissances-recherche-repertoires-projets.jsp>

- 1900 dispositifs expérimentaux et 9 000 parcelles sur l'ensemble du territoire québécois.
- Équipe de 150 personnes dont 35 chercheurs (ingénieurs forestiers et biologistes) et 75 techniciens dans les deux services de recherche.
- Le soutien scientifique est assuré par 34 personnes (professionnels et techniciens).

DIRECTION

Administration • Bureau de projet

SERVICE DE LA GÉNÉTIQUE, DE LA REPRODUCTION ET DE L'ÉCOLOGIE

- Écosystèmes et environnement
- Écologie forestière
- Amélioration génétique des arbres
- Production de semences et de plants
- Géomatique

SERVICE DE LA SYLVICULTURE ET DU RENDEMENT DES FORÊTS

- Sylviculture et rendement des forêts naturelles
 - Peuplements résineux
 - Peuplements mélangés
 - Peuplements feuillus
- Sylviculture et rendement des plantations
- Travail forestier

SERVICE DU SOUTIEN SCIENTIFIQUE

- Laboratoire de chimie organique et inorganique
- Biométrie
- Publication, transfert de connaissances et documentation
- Herbier du Québec
- Forêts d'expérimentation et Forêts d'enseignement et de recherche

GESTION DES SUBVENTIONS À LA RECHERCHE FORESTIÈRE

Ressources naturelles
et Faune

Québec 

Reproduction et production de plants



F. Colas

Aménagement des vergers à graines
(production de semences)
Germination des graines en pépinière



M. Lamhamedi

Écophysiologie
Production de plants
Variabilité clonale
Foresterie internationale



L. Tremblay

Embryogenèse somatique



D. Tousignant

Production de plants par bouturage

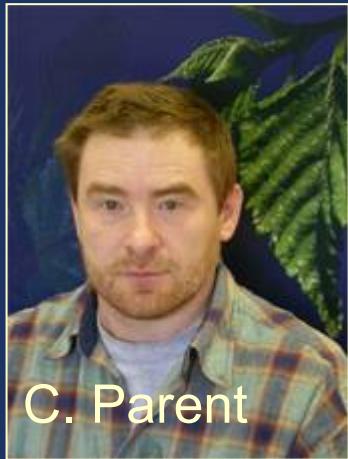


J. Gagnon

Protection des eaux souterraines
Fertilisation

Équipe technique

- Reproduction



C. Parent



M. Pelletier

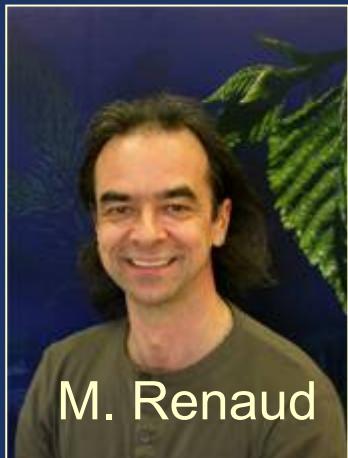


P. Lemay



N. Robert

- Production de plants



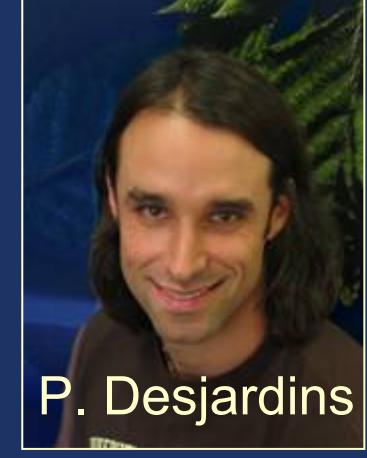
M. Renaud



L. Veilleux



D. Girard



P. Desjardins

Principales activités de recherche

- Projets internes (évaluation par le FQRNT) : installés dans des pépinières privées et publiques
- Projets en réseau au Québec et ailleurs à l'échelle internationale
- Essais techniques
- Transfert de technologie continu (24 pépinières):
 - Ateliers, Carrefour de la recherche, comités techniques
 - Pépinières: avis techniques
- Portée provinciale et internationale des résultats
- Avancement des connaissances

Principales activités de recherche

- 6 pépinières publiques •
- 18 pépinières privées •



Plan de la conférence

- Facteurs & Techniques: Croissance et architecture des racines
 - Modèle du récipient
 - Relation: Hauteur du récipient - Nappe perchée
 - Texture de tourbe idéale pour la production de plants forestiers
 - Date d'ensemencement
 - Repiquage
 - Température du substrat (Gestion des bordures)
 - Fertilisation: pH, CE et toxicité de l'ammonium
 - Lumière en relation avec la photosynthèse et traitements: Jours courts- Jours longs.
- Contrôle et optimisation de l'irrigation
- Variabilité spatiale de l'irrigation (Épinette blanche 2+0)
- Approches d'amélioration de l'endurcissement des plants et de la croissance des racines
- Conclusion

Qualité morpho-physiologique des plants



- 25 critères et normes de qualité morpho-physiologique des plants

Parmi ces critères:

- Concentration foliaire en azote des plants ;
- Insuffisance racinaire (critère 01): manque de cohésion et faible quantité de racines (DPSP, MRNF);
- etc.

Pour avoir une copie:

Direction de la production des semences et des plants (DPSP)

Tél. (418) 627- 8600

Semences. plants@mrnf.gouv.qc.ca

Ressources naturelles
et Faune

Québec

Modèle du récipient



Exemple de modèles de récipients utilisés au Québec

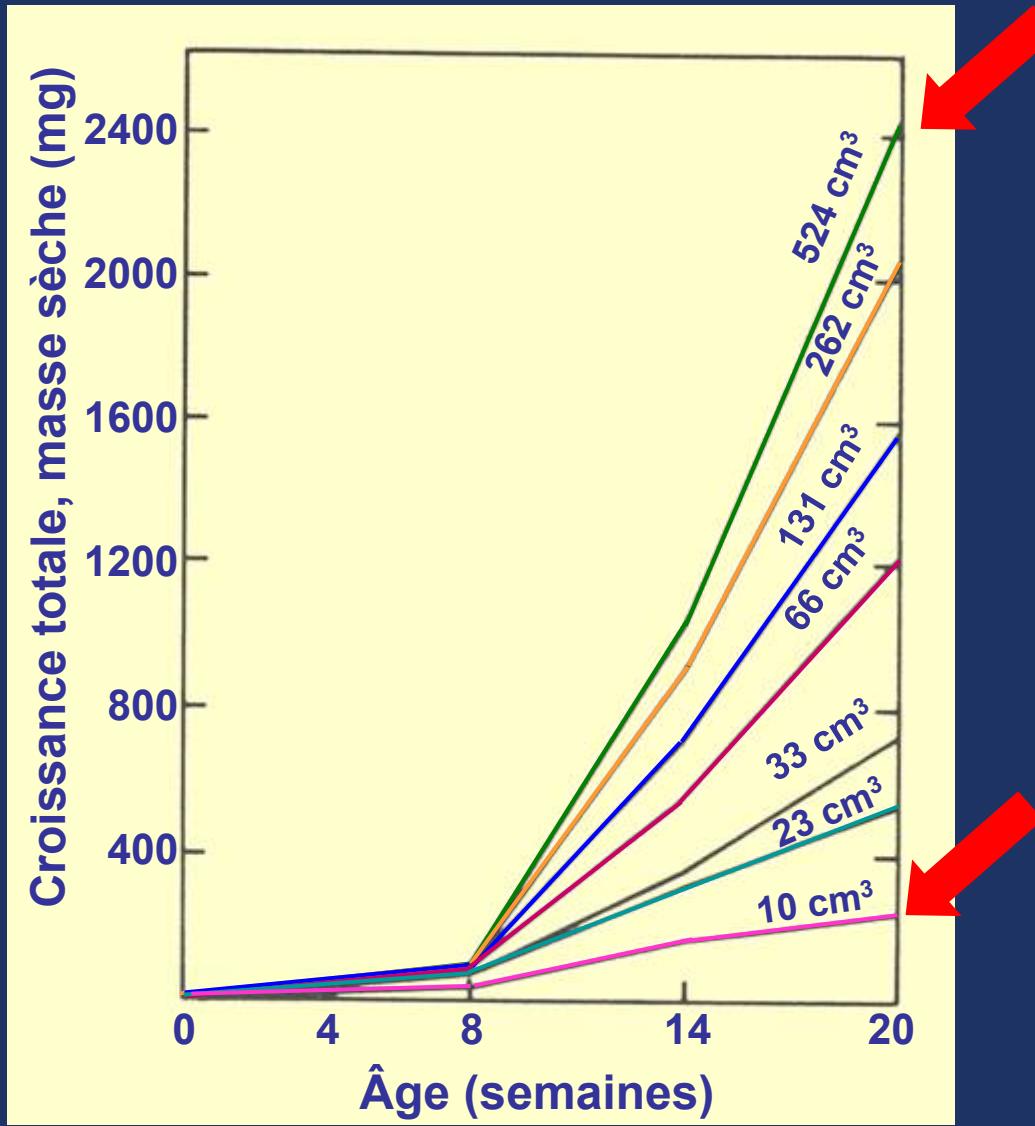
- Forme de la cavité
- Volume, haut. & diam.
- Défilement
- Type de rainure
- Nombre de cavités/récipient
- Paroi: Ajourée ou pleine
- Couleur



- Transfert de chaleur et de froid
- Homogénéité de la densité du substrat dans la cavité
- Nombre de plants/m²
- Passage des racines



Effet du volume de la cavité sur la croissance des plants



Endean & Carlson (1975) - Carlson et Endean (1976)

Propriétés physico-chimiques du substrat: Exemple de la densité du substrat

- Composition
- Texture
- Structure
- Densité
- Porosité
- Capacité de rétention en eau
- CEC
- pH
- Diffusion des gaz
- etc.



Densité = 0,11 g/cm³



Densité ≥ 0,7 à 1 g/cm³

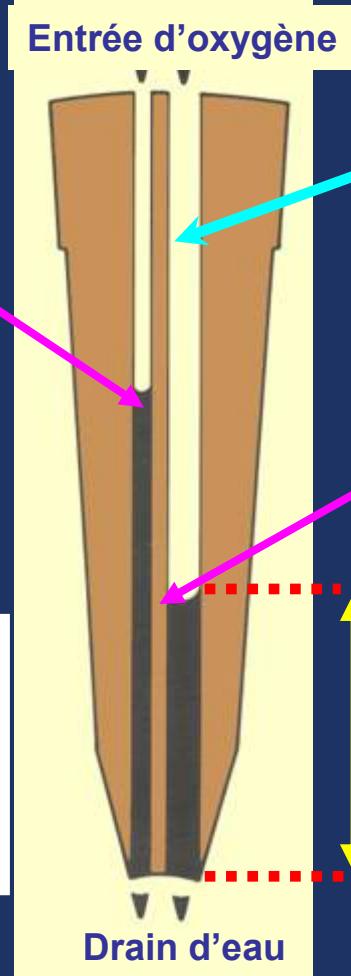
Photos: M. S. Lamhamadi

Ministère
et Faune
Québec

Effet de la dimension des particules du substrat sur la capillarité de l'eau

Texture fine

$$h(m) = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r\rho g}$$

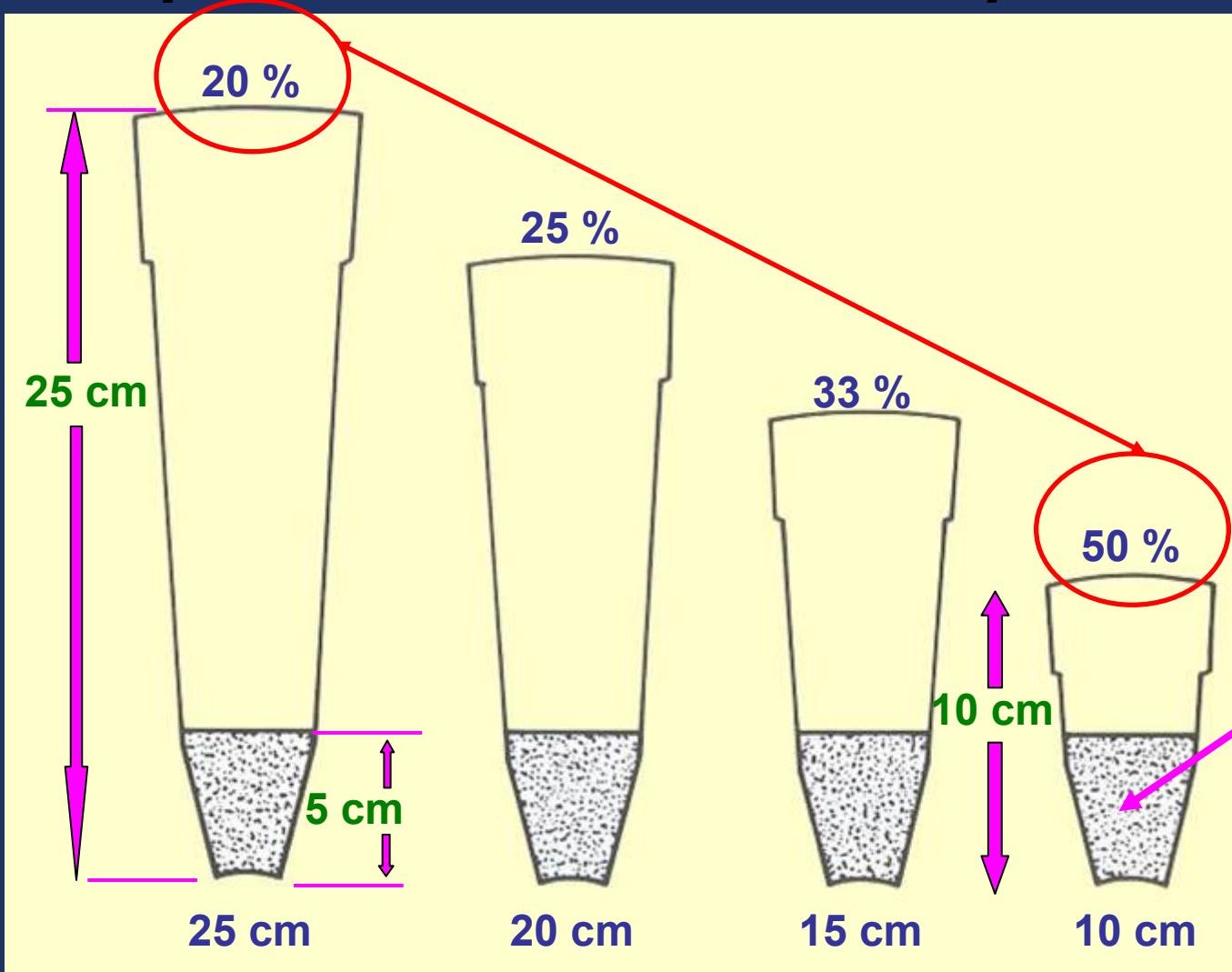


r (m): rayon de la colonne d'eau

Texture grossière

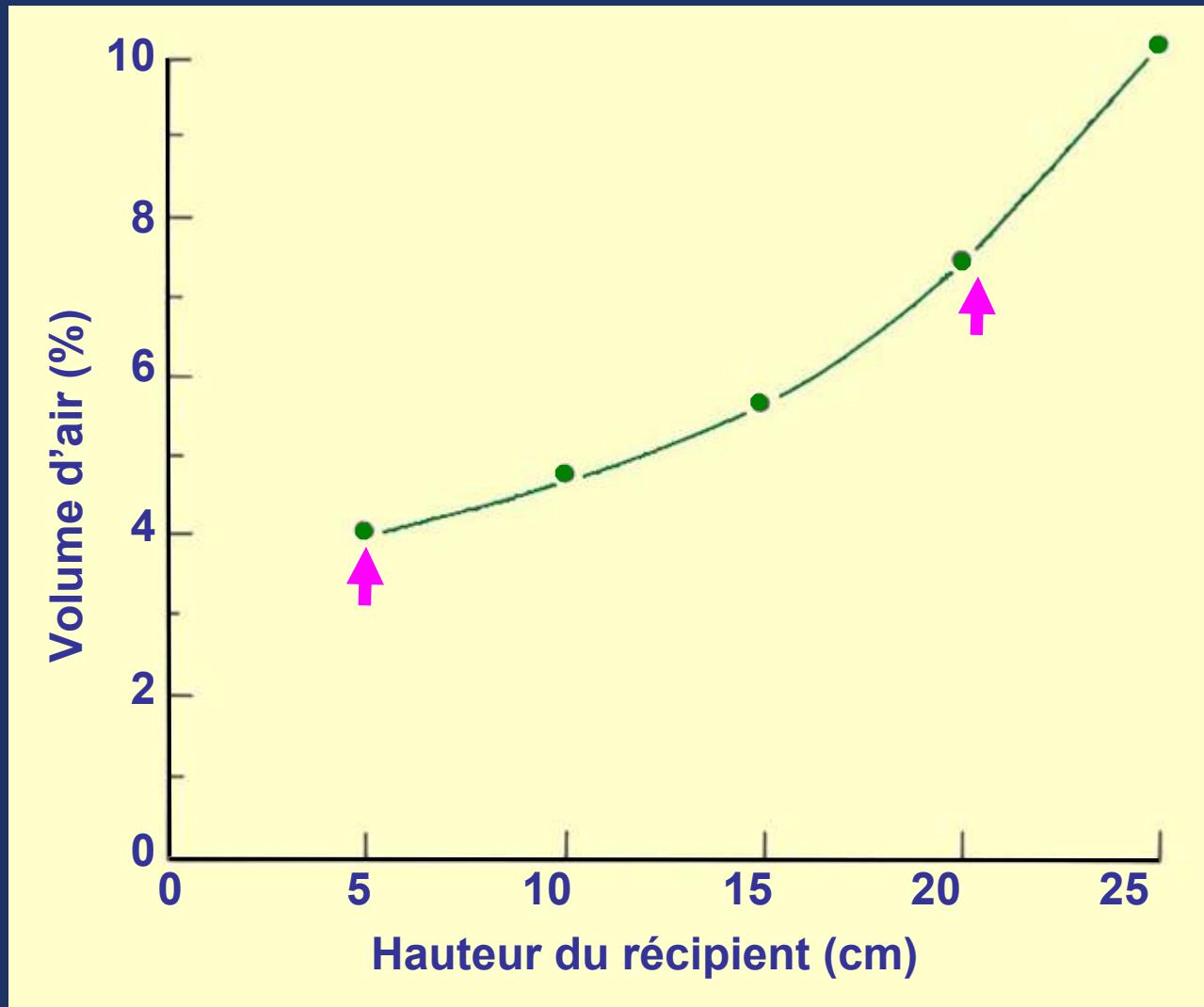
$$h(m) = \frac{1,49 \times 10^{-5} m^2}{r(m)}$$

Effet de la hauteur du récipient sur la nappe perchée à la base de chaque cavité



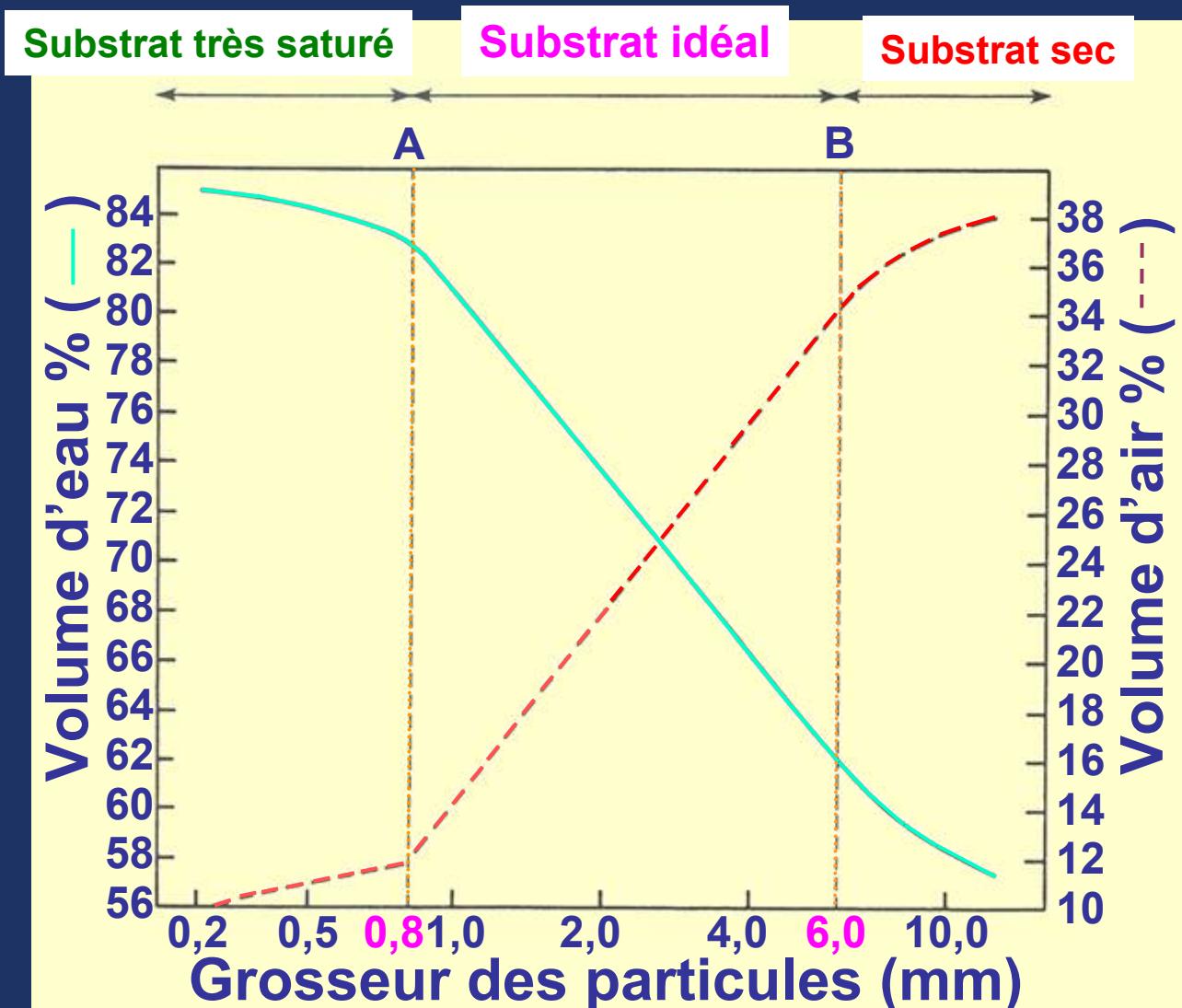
Nappe
perchée

Variations de la porosité d'aération selon la hauteur du récipient



(Bunt 1976, Landis et al. 1989)

Variations du volume d'eau (%) et du volume d'air (%) selon les dimensions des particules d'un substrat tourbeux

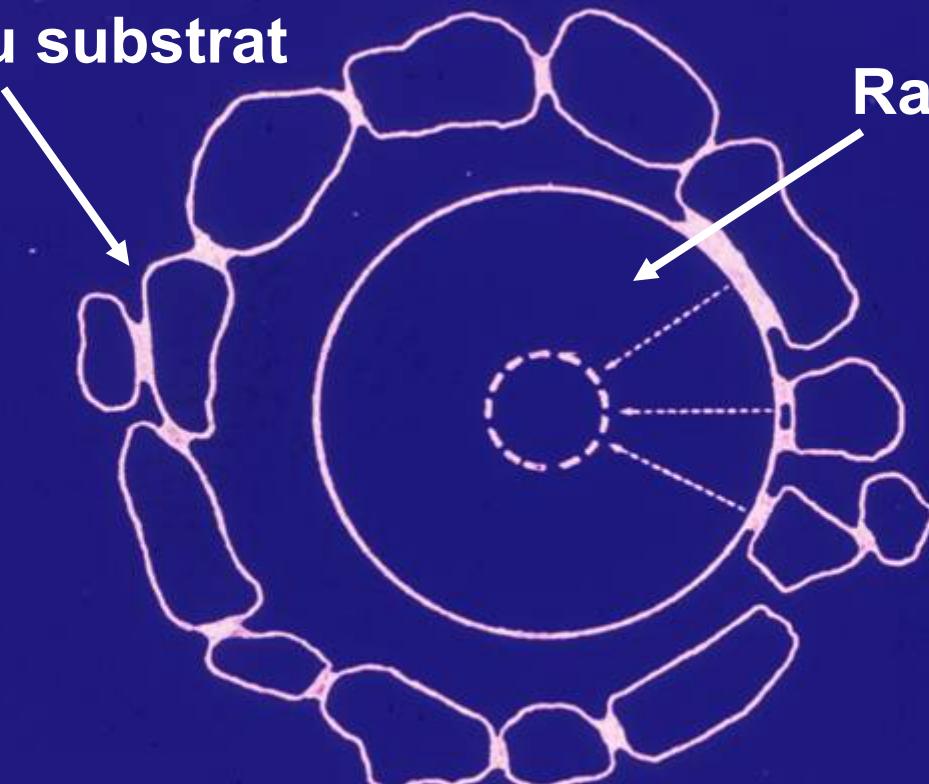


Adapté de (Puustjarvi et Roberston 1975)

Contact substrat-racine en période de sécheresse ou en présence de poches d'air

Particules du substrat

Racine



Lamhamedi et al. 1992 . Tree Physiol. 10: 153-167

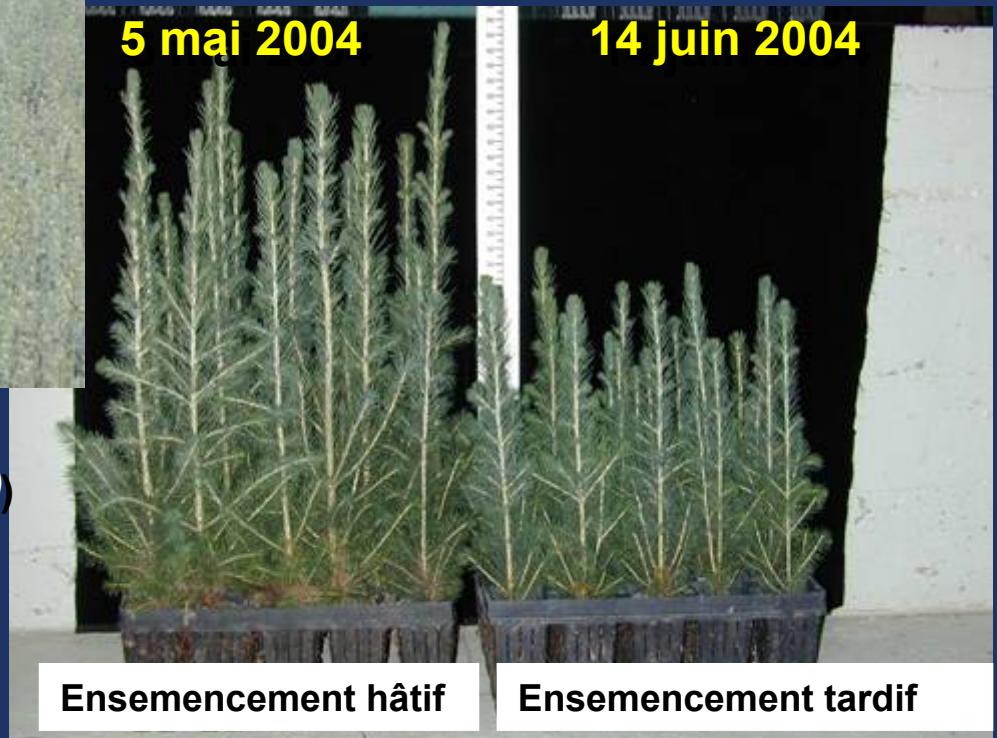
Effets de la date d'ensemencement: Cas de l'épinette blanche (2+0)



Pépinière: Saint-Modeste

Substrat: tourbe-vermiculite (80% - 20%)

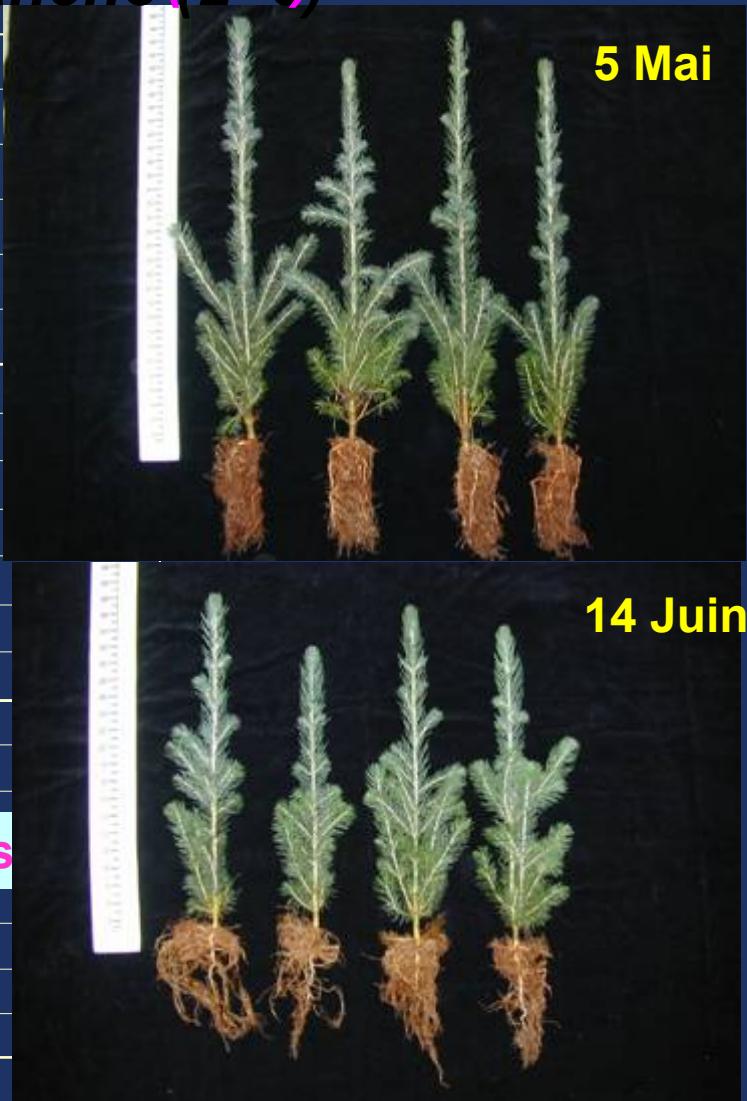
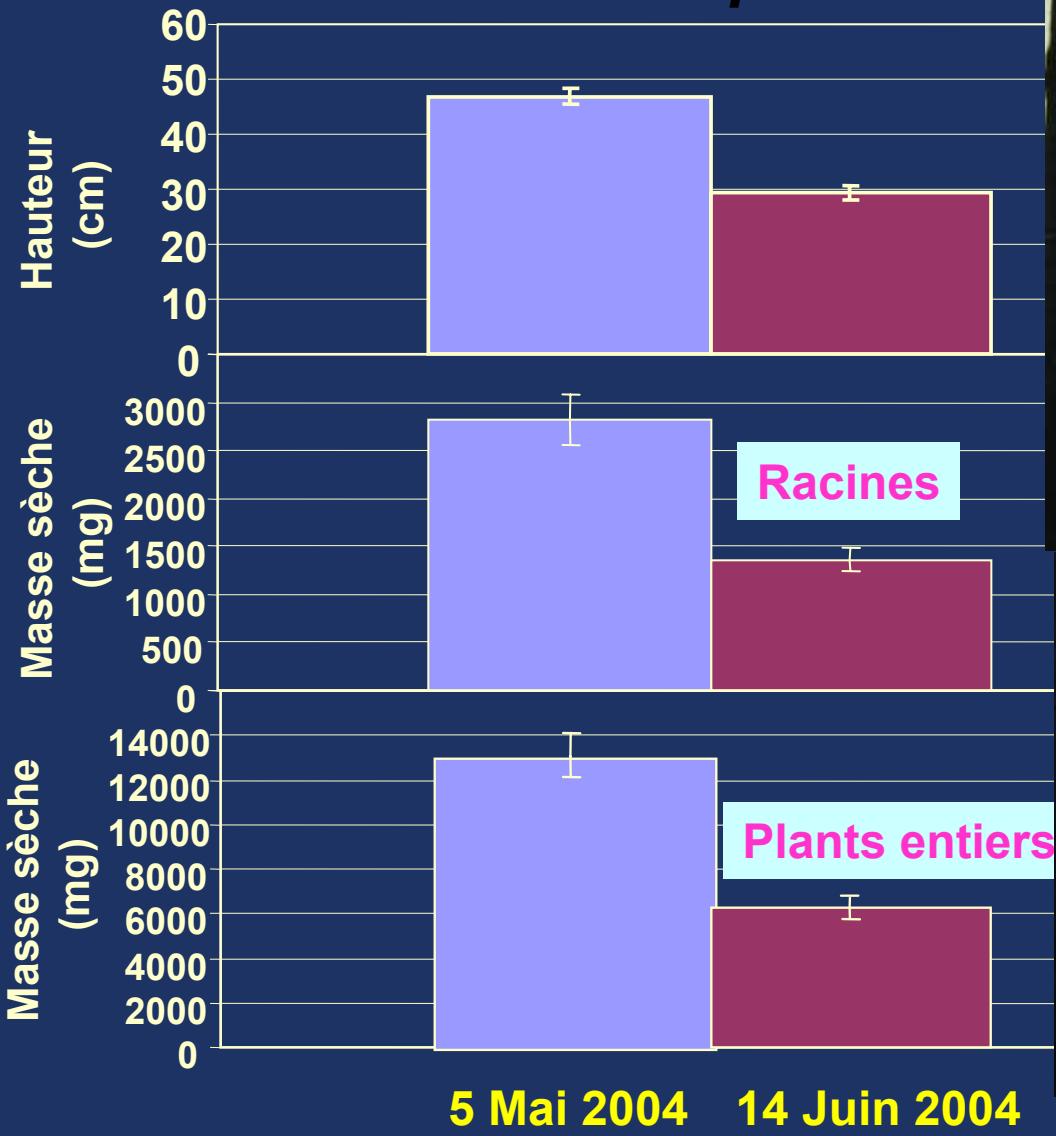
Récipient: 25-350A



Photos: M. Renaud

et Faune
Québec

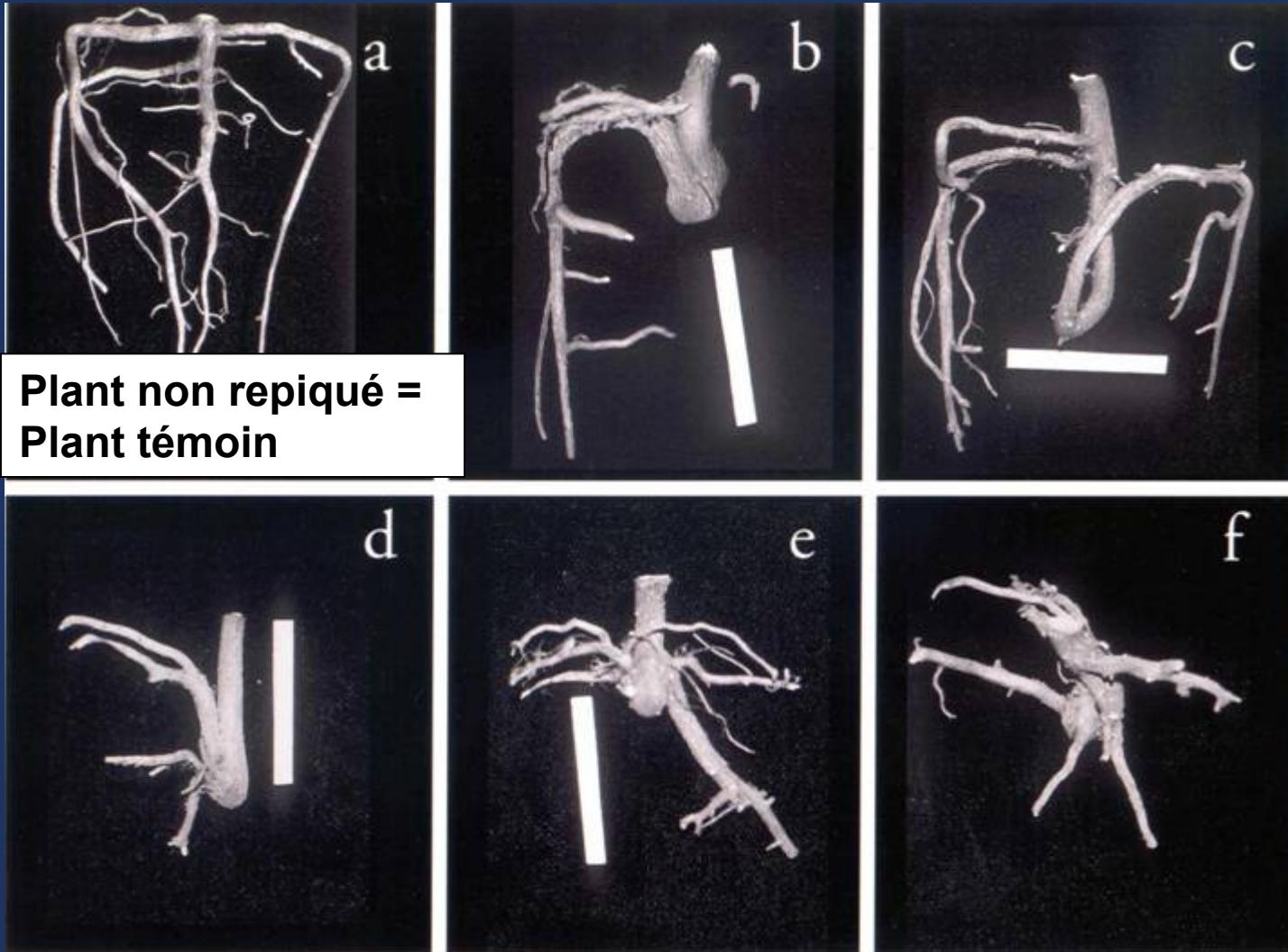
Effets de la date d'ensemencement: Cas de l'épinette blanche (2+0)



Photos: M. Renaud

Québec

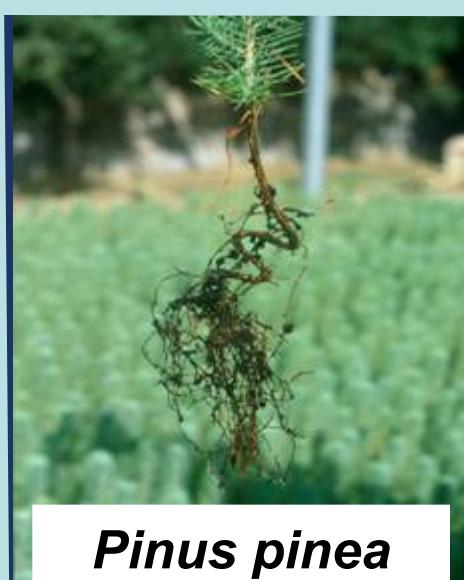
Effets du repiquage (taux < 1 à 5%) : *Exemple de l'épinette blanche*



Lamhamedi *et al.* Tree Physiol. (2000) 20: 869-880

ces naturelles
Québec

Effets du repiquage: Épinette blanche et Pin pignon



Pinus pinea

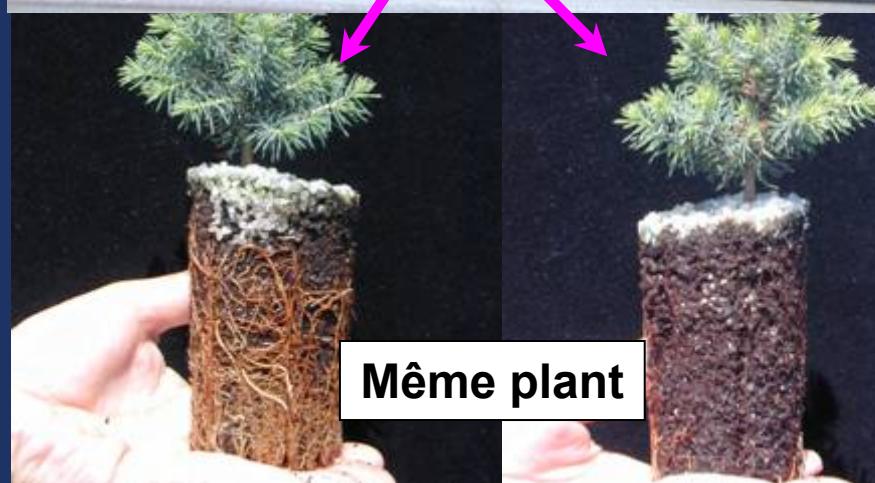


Photos: P. Lemay & M.S. Lamhamadi

Gestion des bordures selon l'interaction: Couleur*température*teneur en eau du substrat



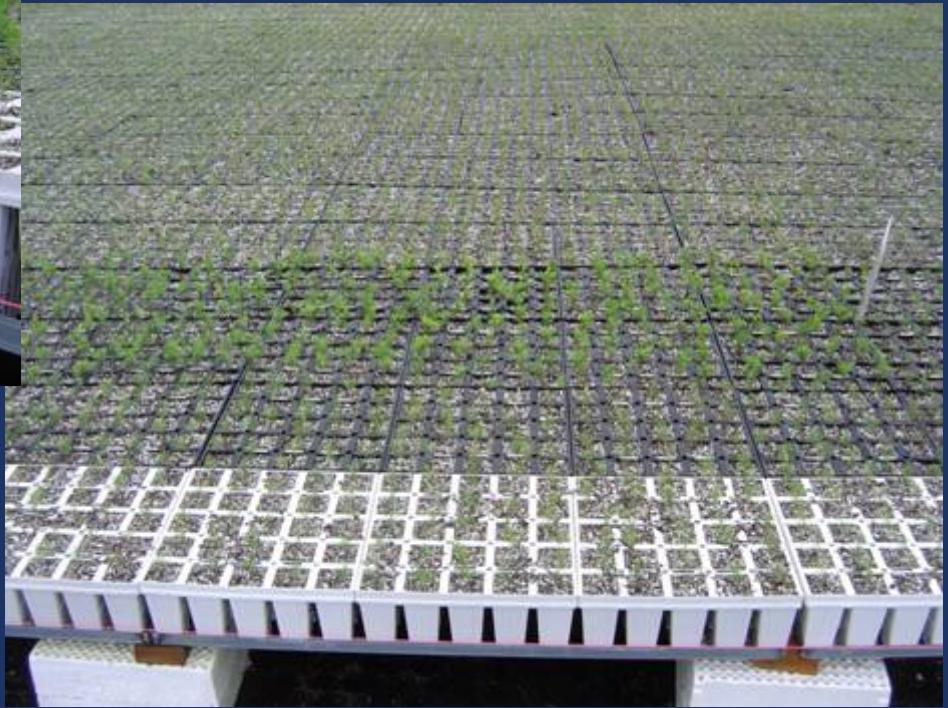
Épinette blanche (2+0)



Photos: M. Lamhamedi & S. Carles



Exemple de gestion des bordures dans une pépinière forestière en Oregon (USA)



Photos: T. Landis (Oregon, USA)

Ressources naturelles
et Faune
Québec

Exemple de gestion des récipients de bordure au Québec



**Protection des bordures
sous tunnel**



**Protection des bordures
à l'extérieur**



Tuyau scintillant

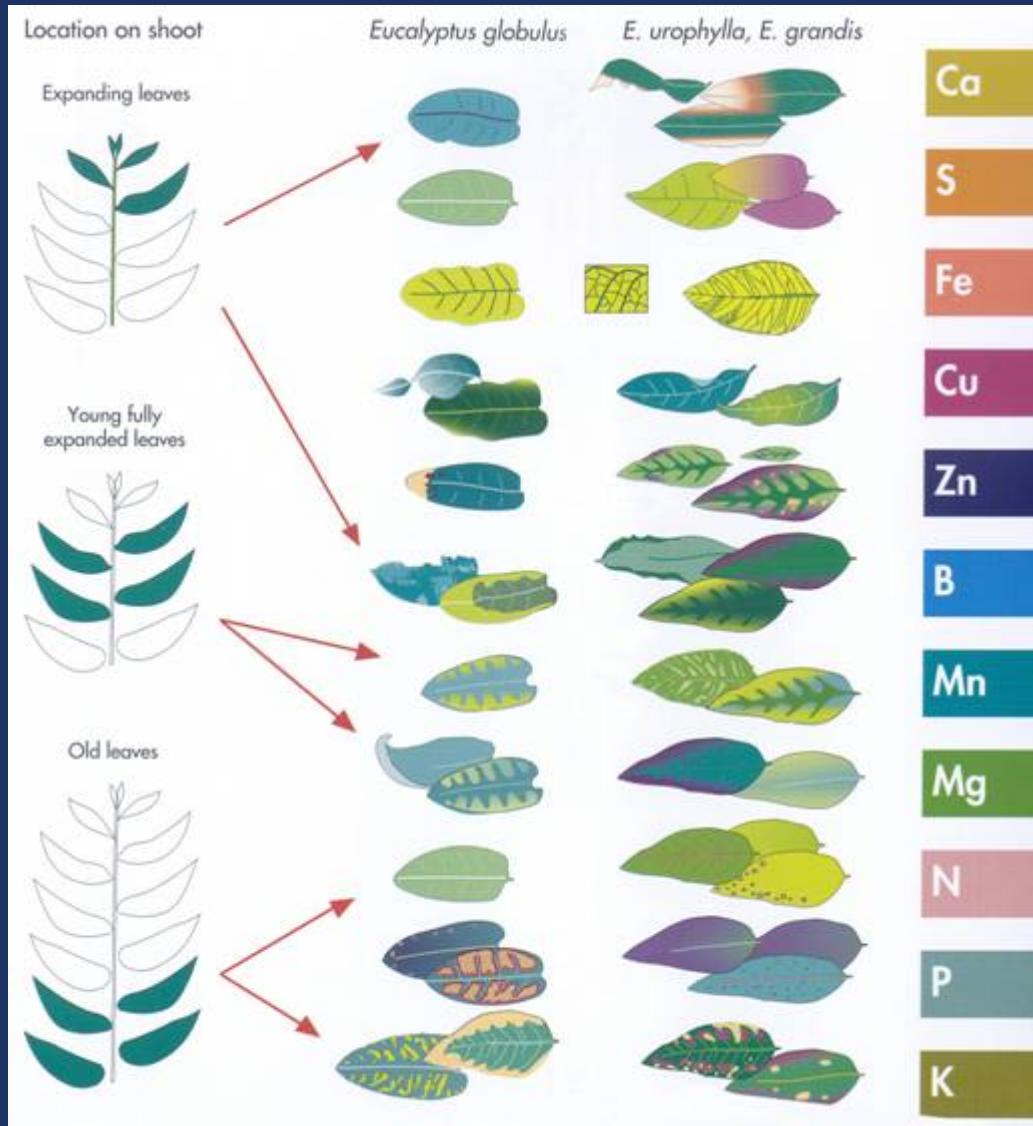
Photo: M. Renaud & B. Fecteau



Apport d'appoint

Protection en styréofam

Fertilisation: 13 éléments minéraux essentiels à la croissance des racines et des parties aériennes



Dell, B. et al. (1995)

• Rôle nutritif spécifique de chaque élément

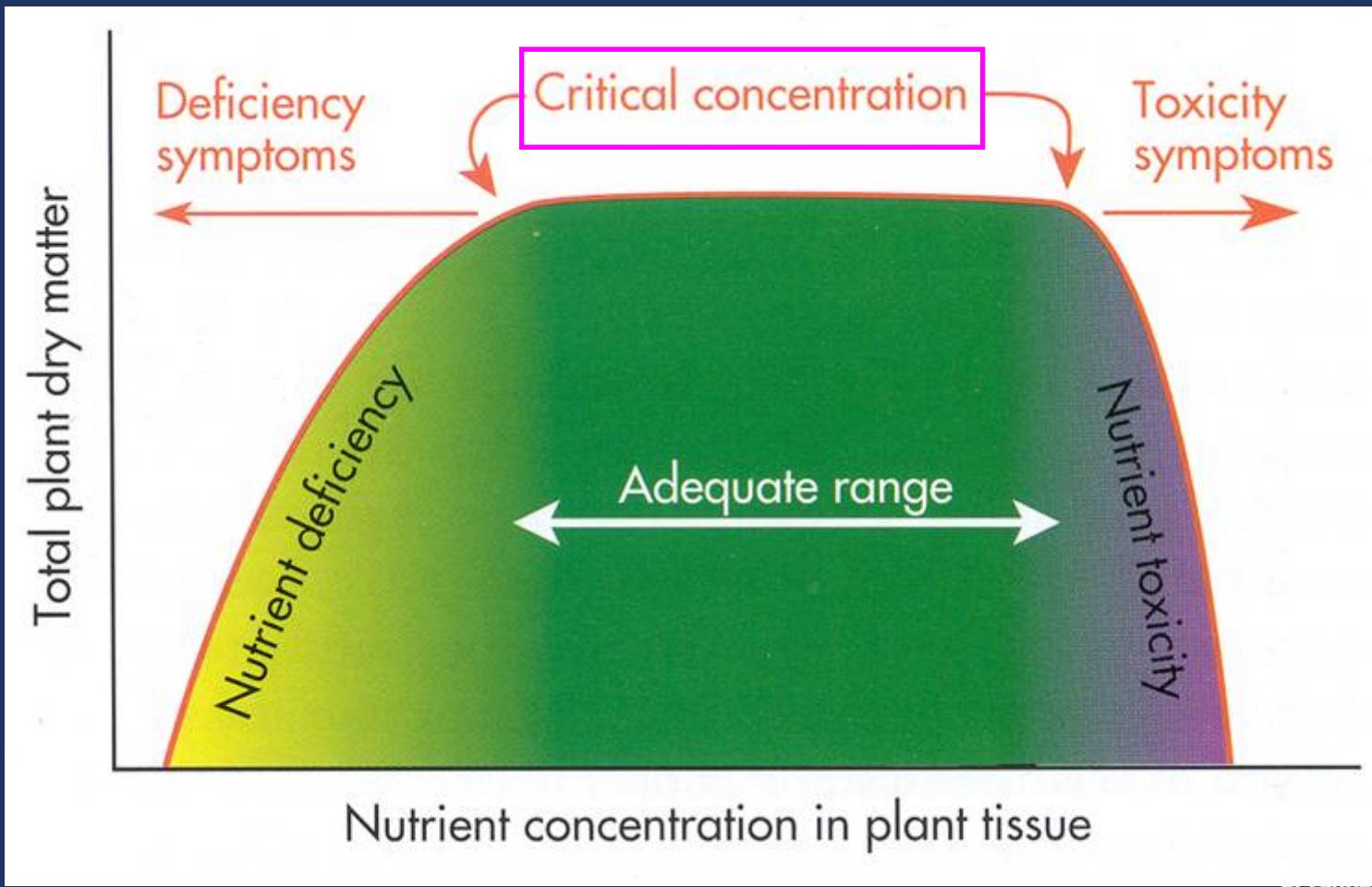
• Respecter les ratios entre les éléments minéraux, par exemple:

- N : 1.00
- P : 0.30
- K : 0.50
- Ca : 0.04
- Mg : 0.05
- etc.

Ressources naturelles
et Faune

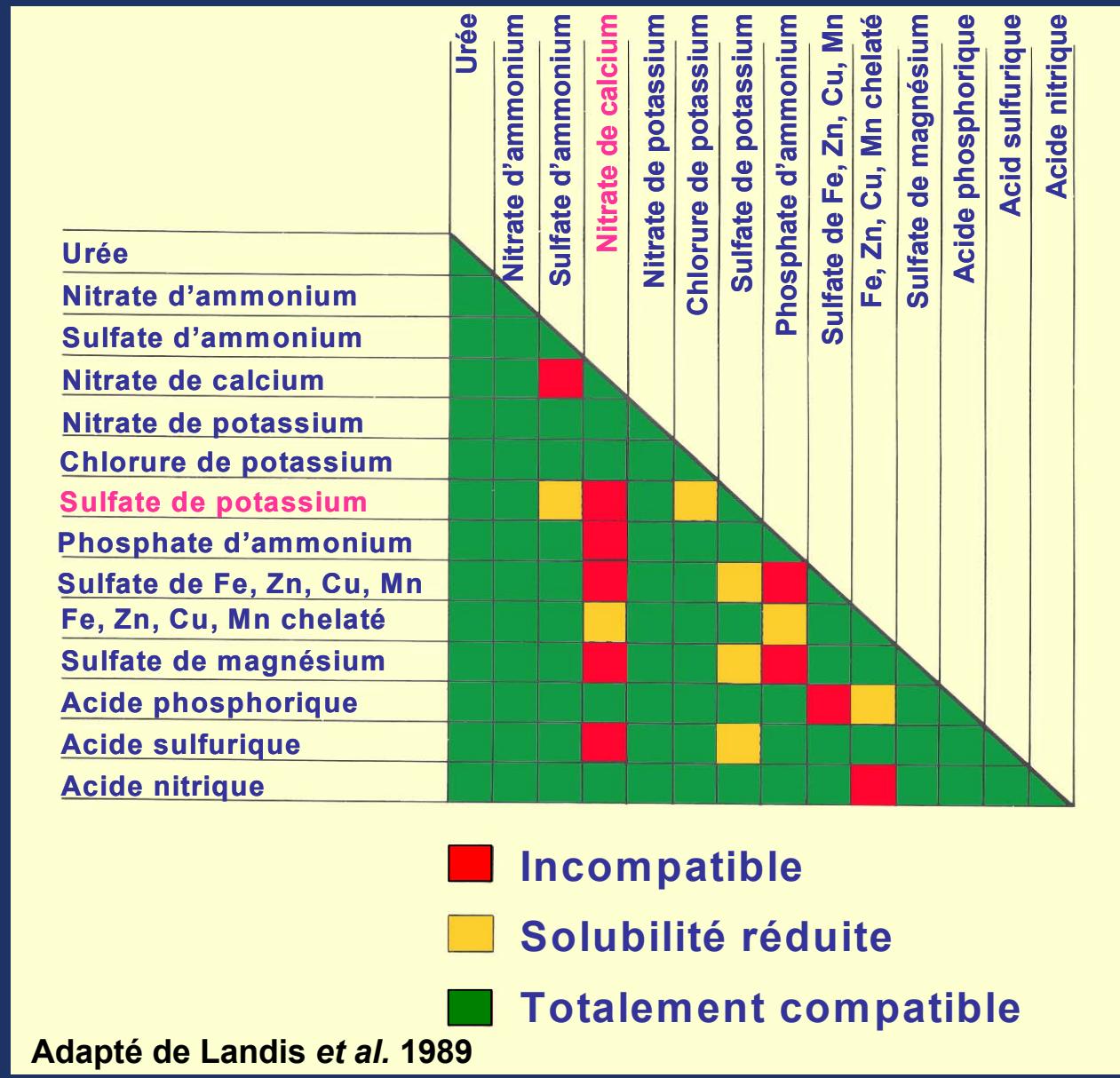
Québec

Relation entre la croissance et la concentration dans les tissus des éléments minéraux

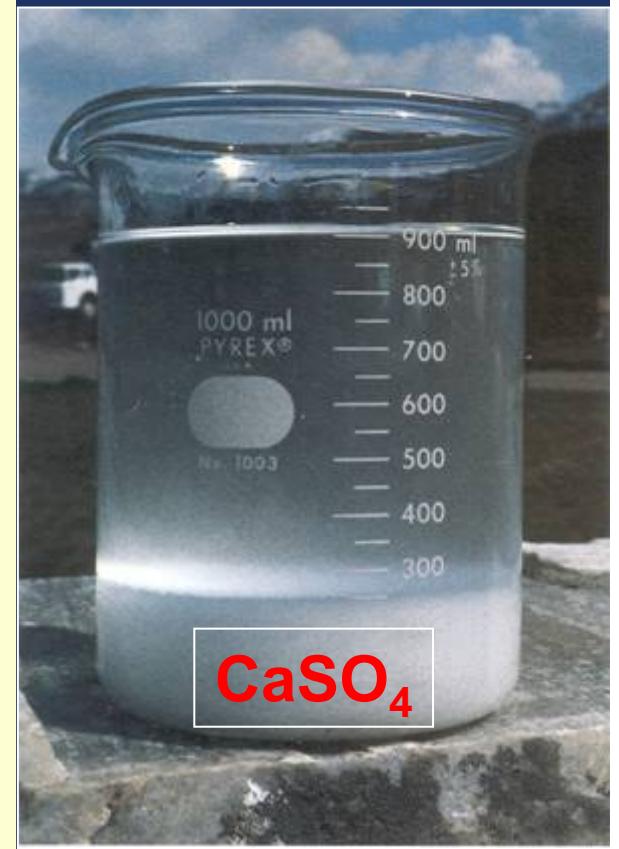


Dell, B. et al. (1995)

Trois règles usuelles à vérifier lors de la fertilisation: Compatibilité, solubilité et indice de salinité

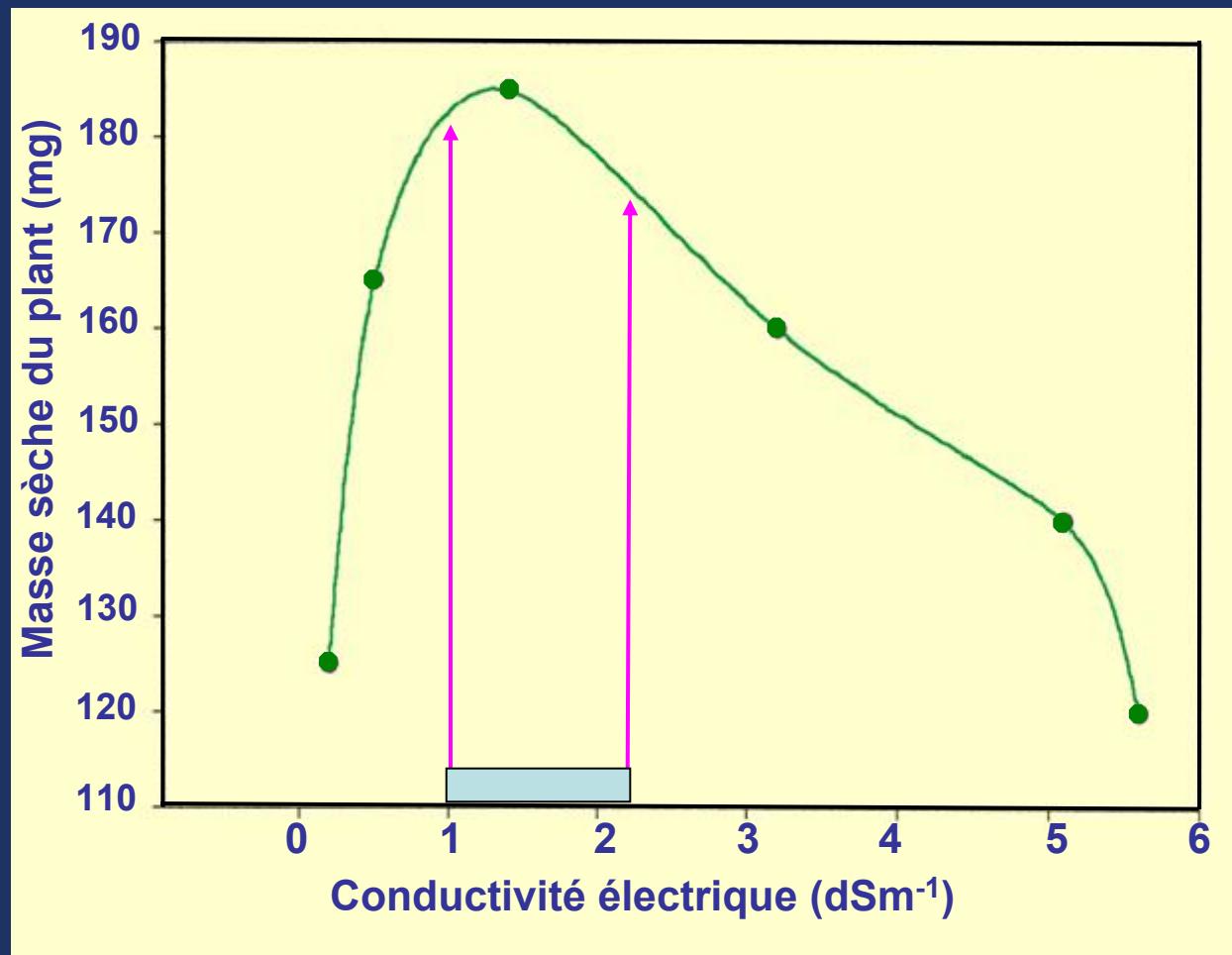


Adapté de Landis et al. 1989



Ressources naturelles
et Faune
Québec

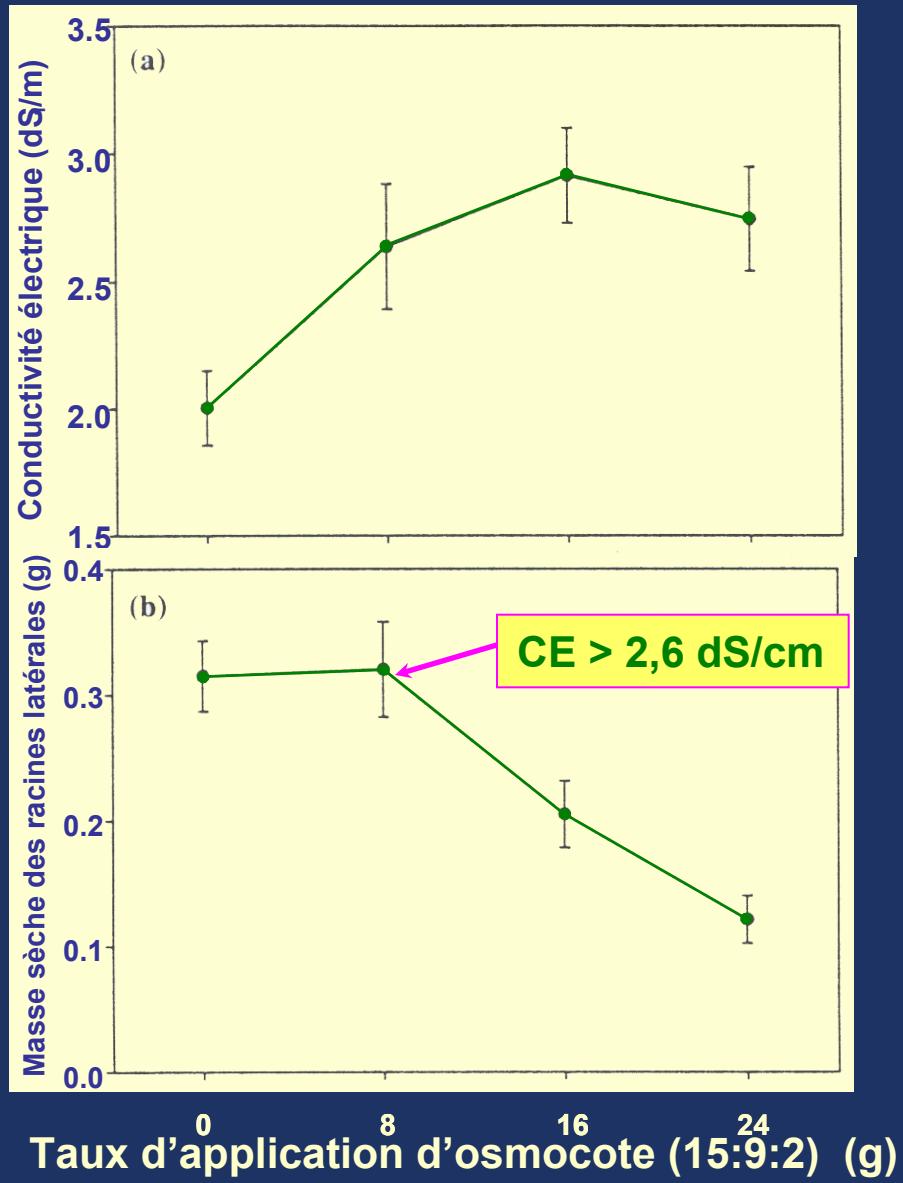
Effet de la conductivité électrique sur la croissance des plants (*Pinus résinosa Ait*)



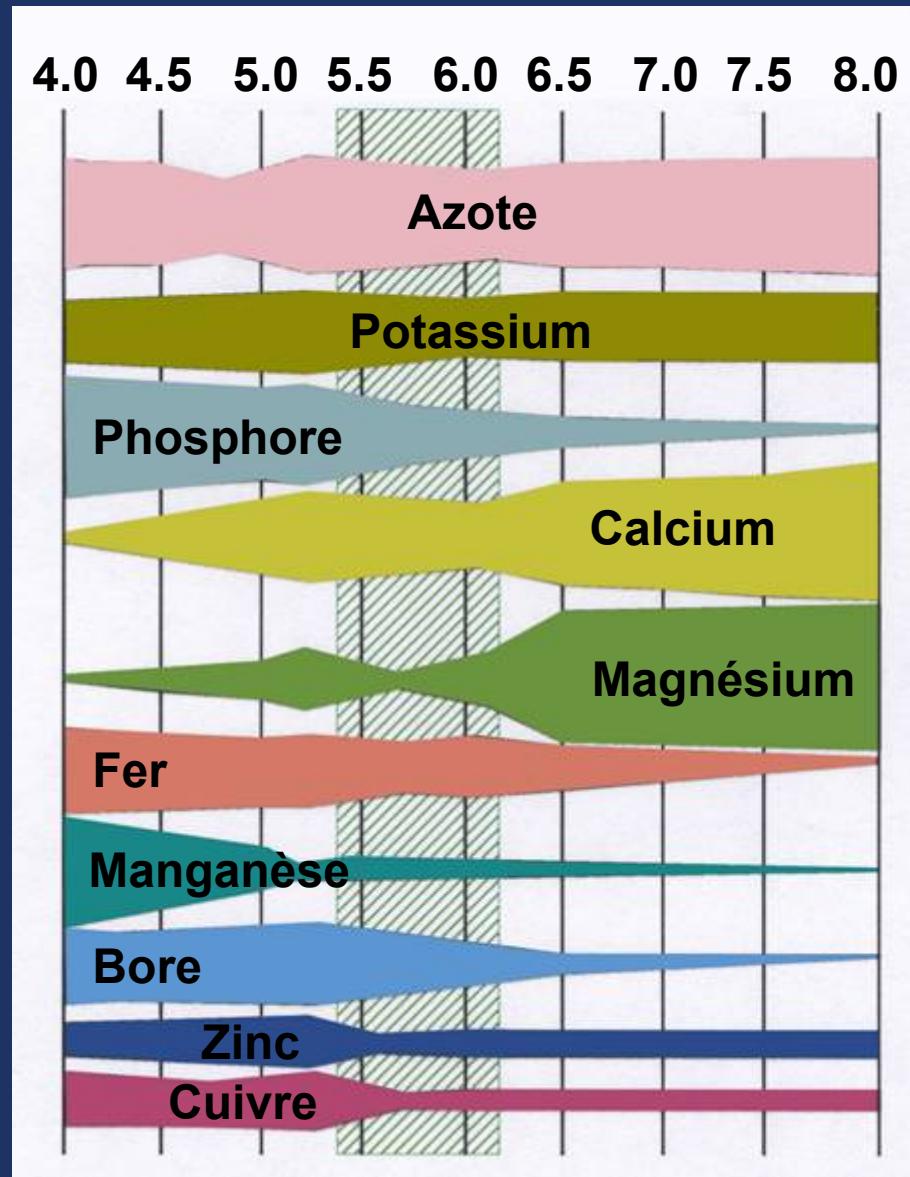
Timmer et Parton 1984

Effet de la conductivité électrique sur la croissance des racines latérales des plants (*Pseudotsuga menziesii*)

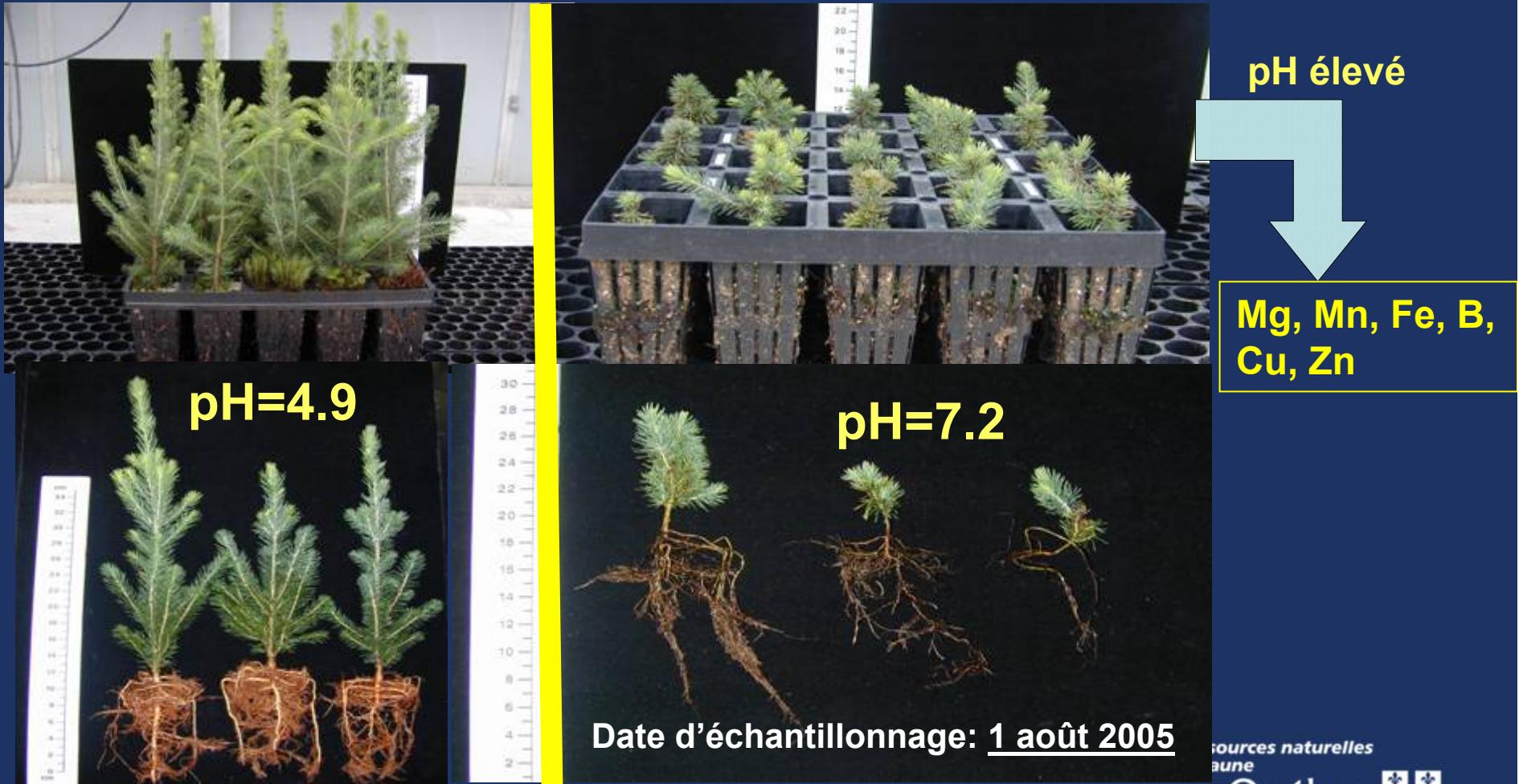
Jacobs et al. 2003



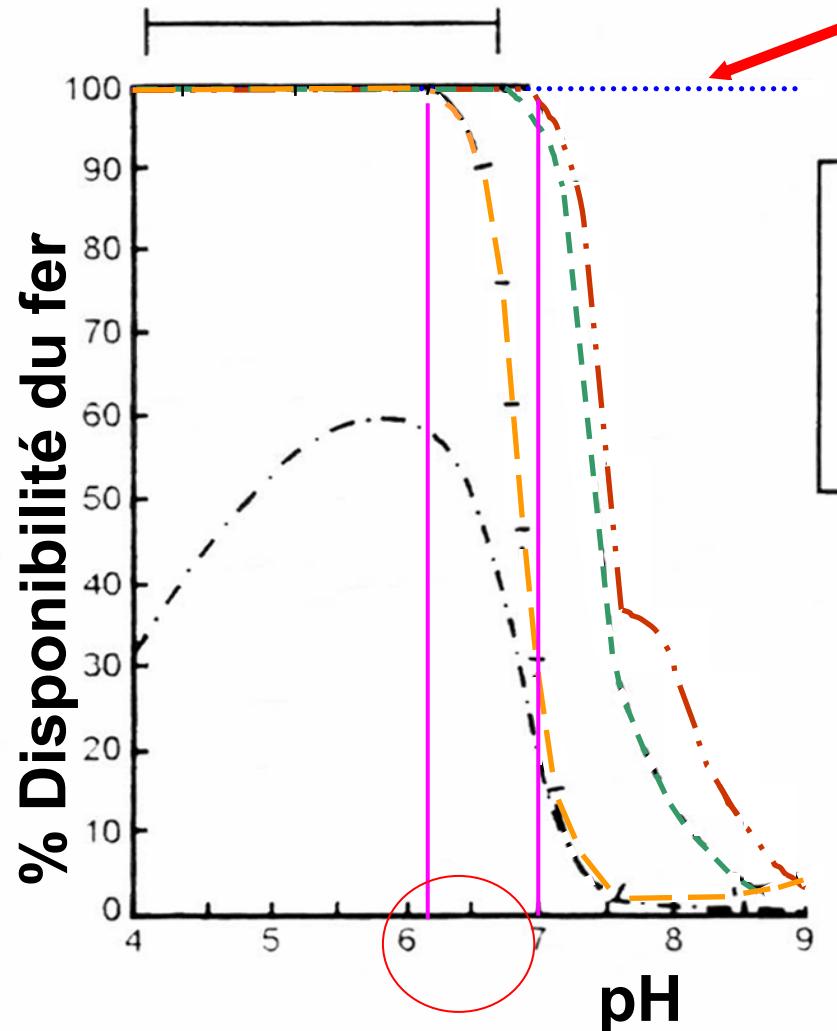
Disponibilité des éléments minéraux selon le pH de la solution du sol



Effet de l'augmentation du pH sur la croissance des plants d'épinette blanche (2+0) dans une pépinière forestière : Cas de l'amendement avec de la chaux dolomitique (4,8 Kg/m³)



Disponibilité du fer en fonction du pH



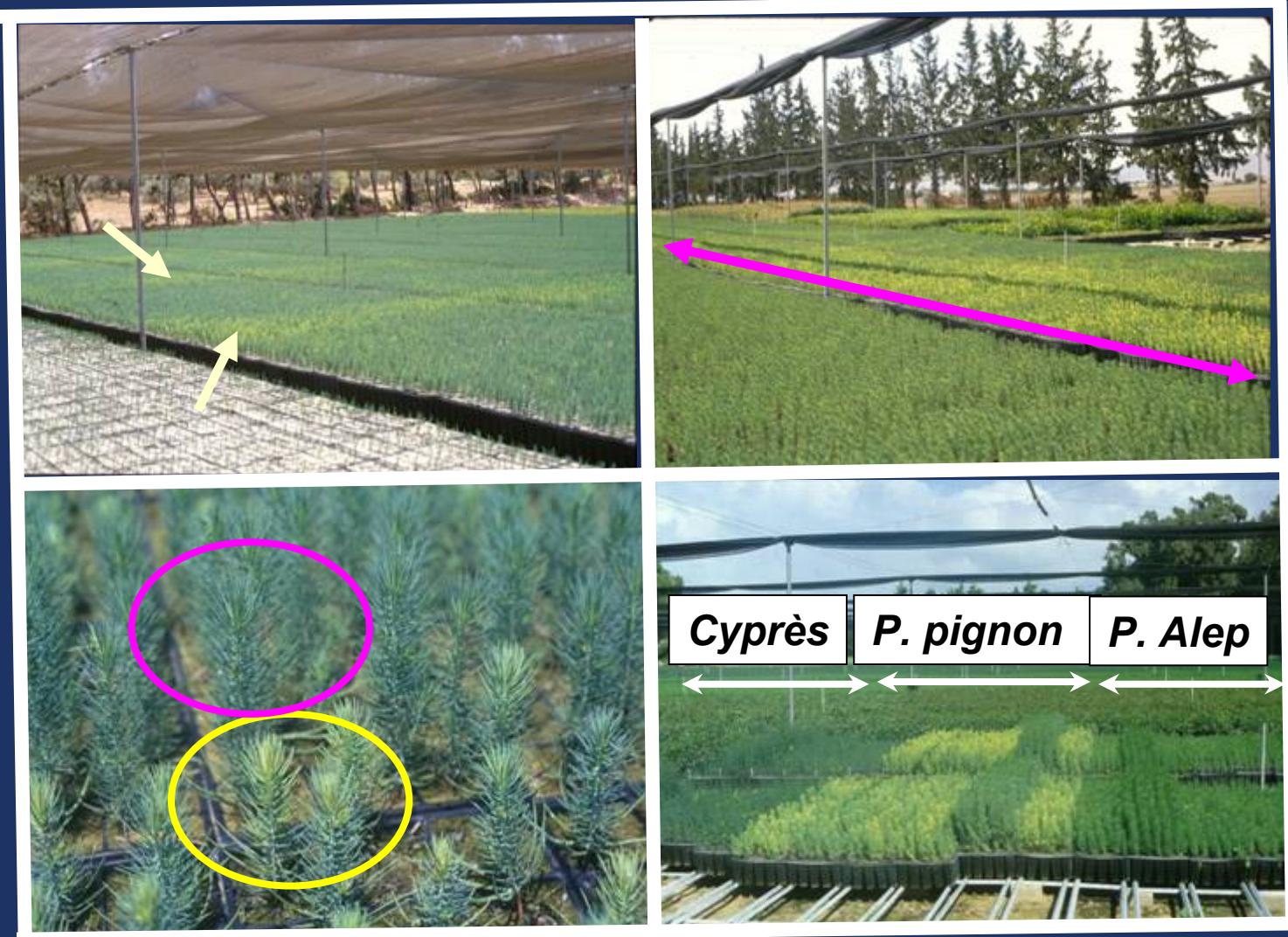
EDDHA
HEDTA
EDTA
CDTA
DTPA



Photo: M. S. Lamhamadi (*Pinus Oocarpa*), Nicaragua

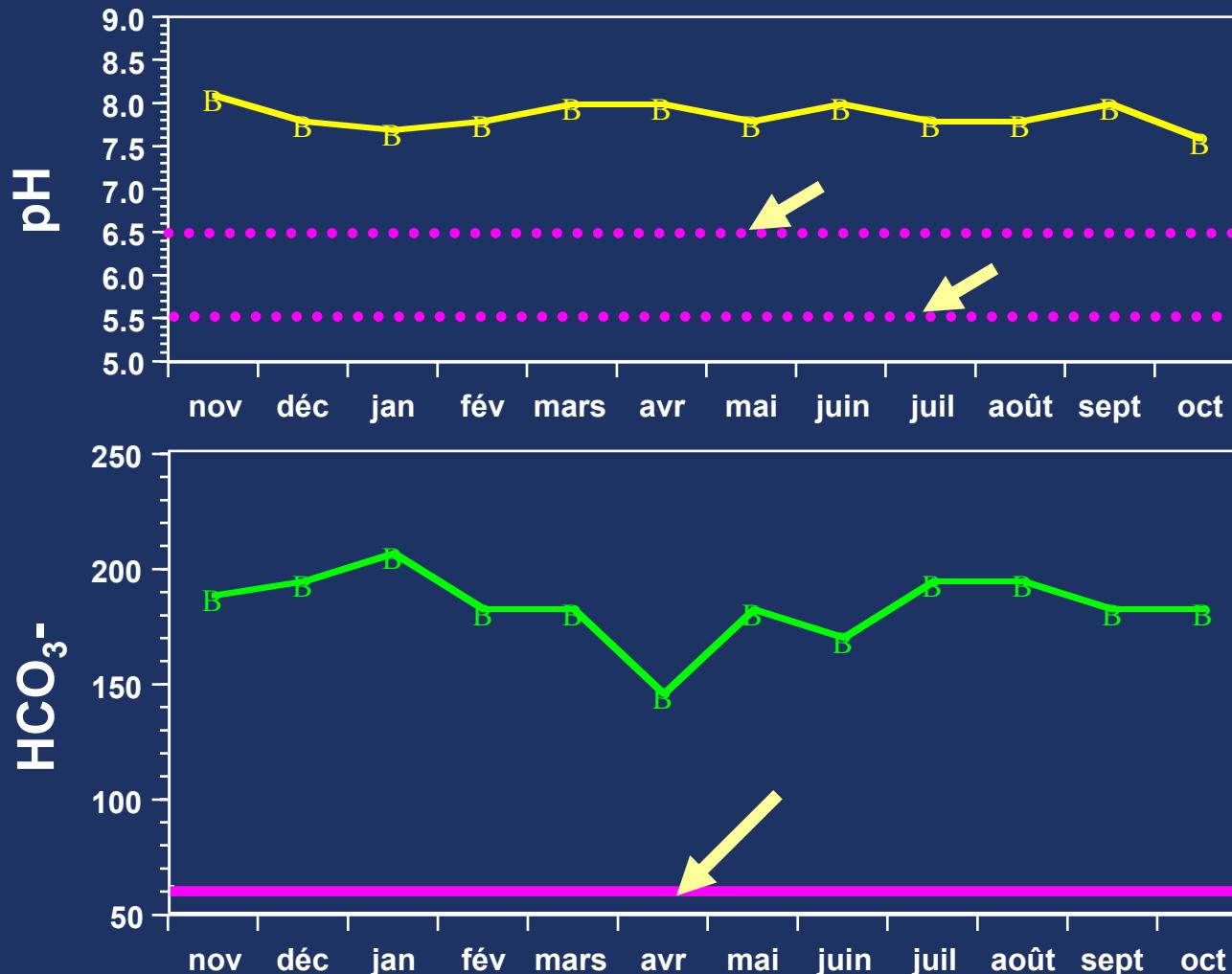
Québec

Disponibilité du fer (pH et bicarbonates): Tunisie



Lamhamedi, M. S., Abourouh, M., Fortin, J. A. 2007. Chapitre d'un livre.
NRC Research Press, Ottawa, Canada (Sous presse)

pH et bicarbonates (pépinière de Kasserine, Tunisie)



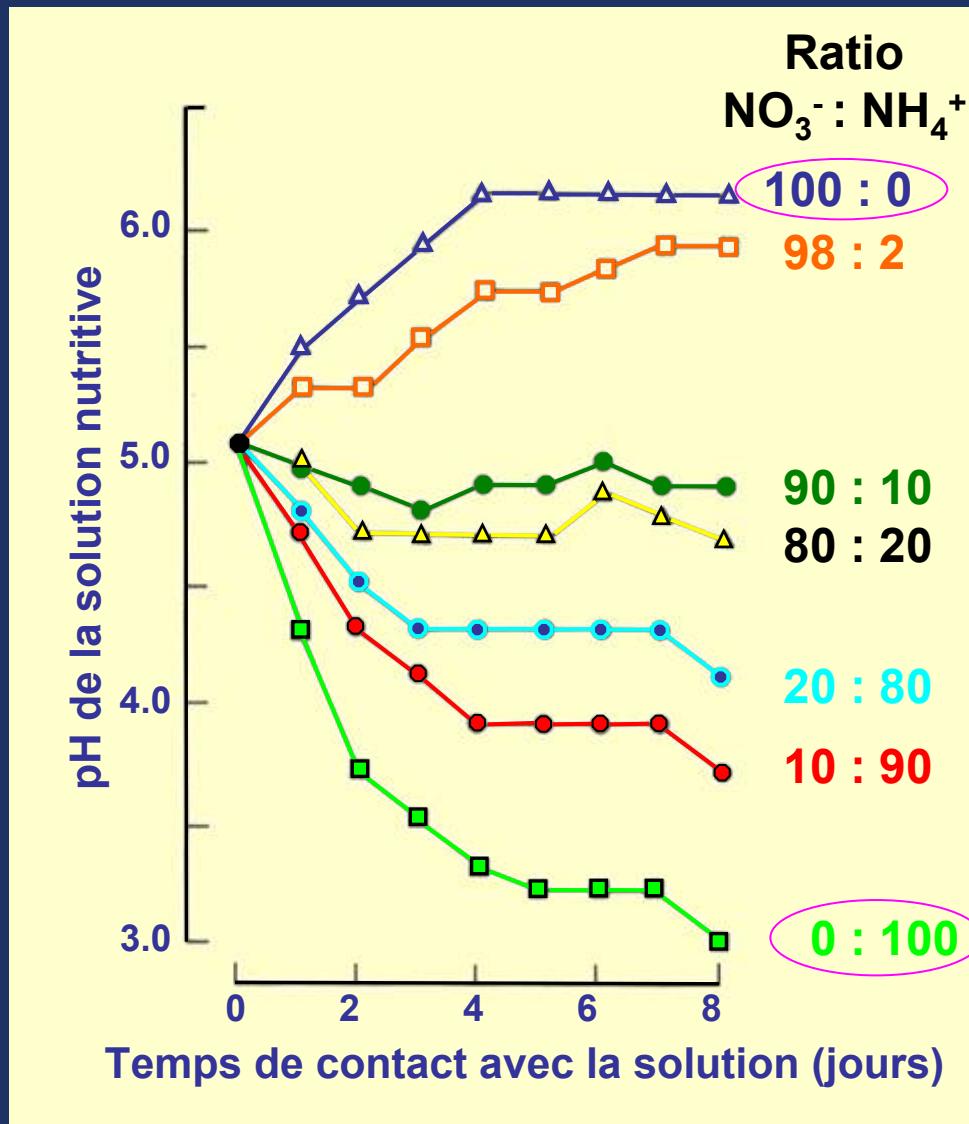
Lamhamadi, M. S., Abourouh, M., Fortin, J. A. 2007. Chapitre d'un livre.

NRC Research Press, Ottawa, Canada (Sous presse)

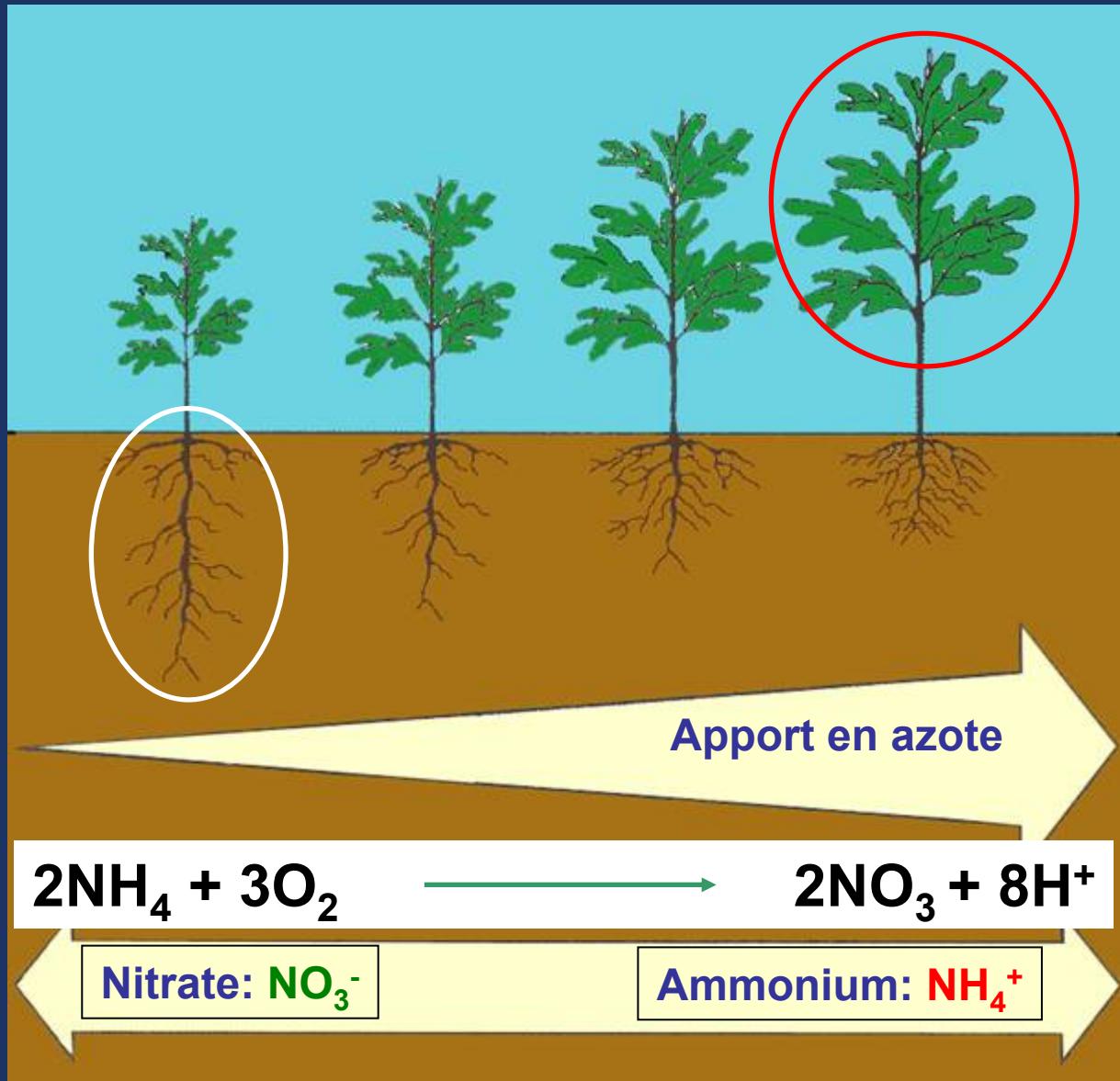
Ressources naturelles
et Faune

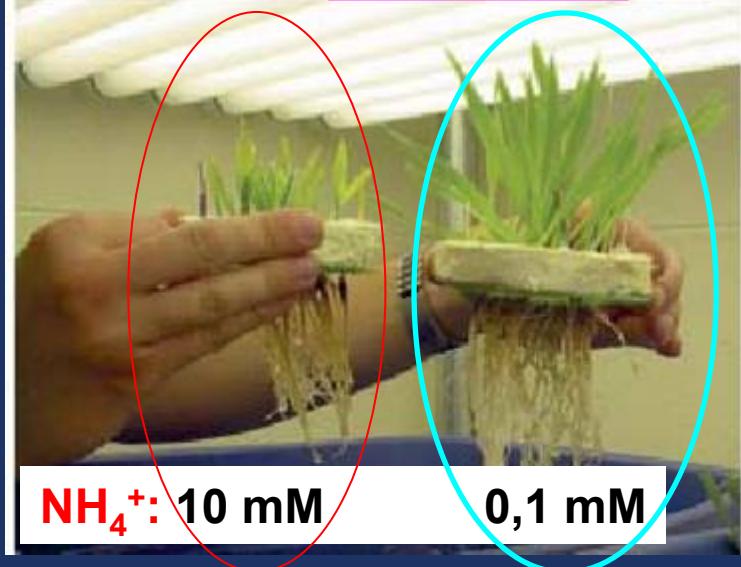
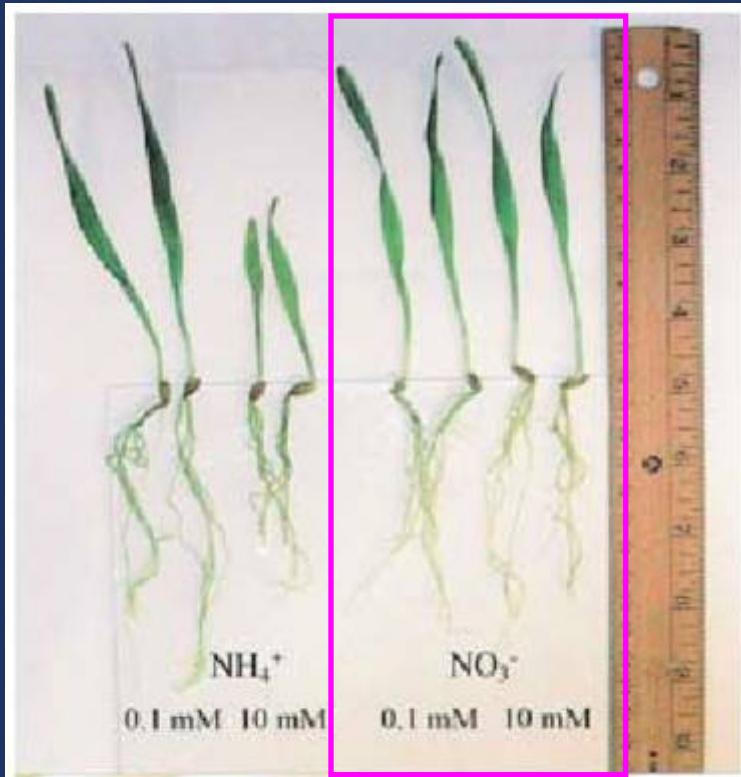
Québec

Variations du pH selon les proportions en nitrate et en ammonium



Importance de la source d'azote sur la croissance des racines et des parties aériennes

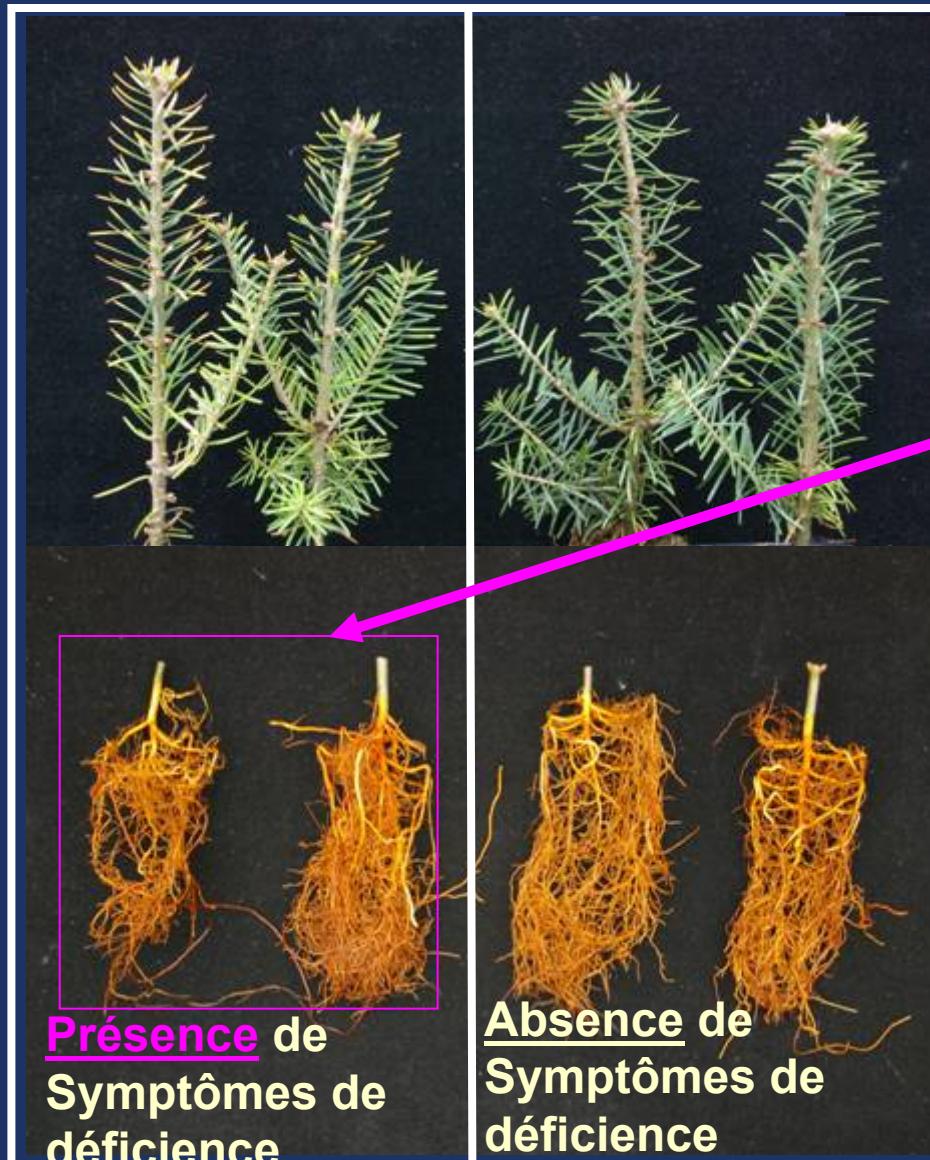




Toxicité de l'ammonium, mais pas celle des nitrates

Britto et Kronzucker (2002)

Exemple d'une déficience en magnésium



Necrose des apex

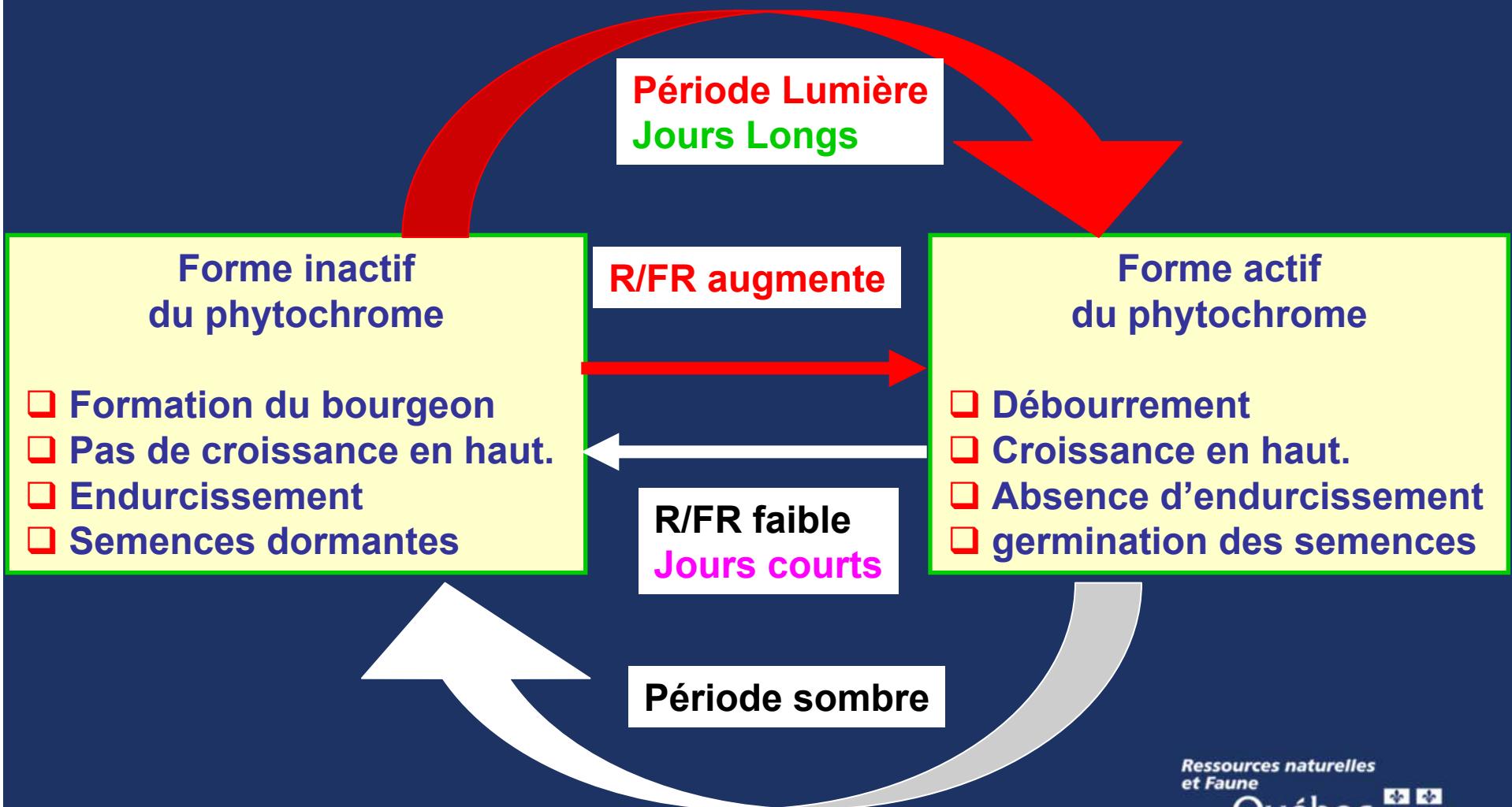
Chlorose des apex

- Apport faible ou non fréquent
- Fertilisation très riche en azote (Ammonium, NH₄ <25%)
- Ca:Mg (2:1 à 3:1)
- K:Mg (2,5:1 à 4:1)

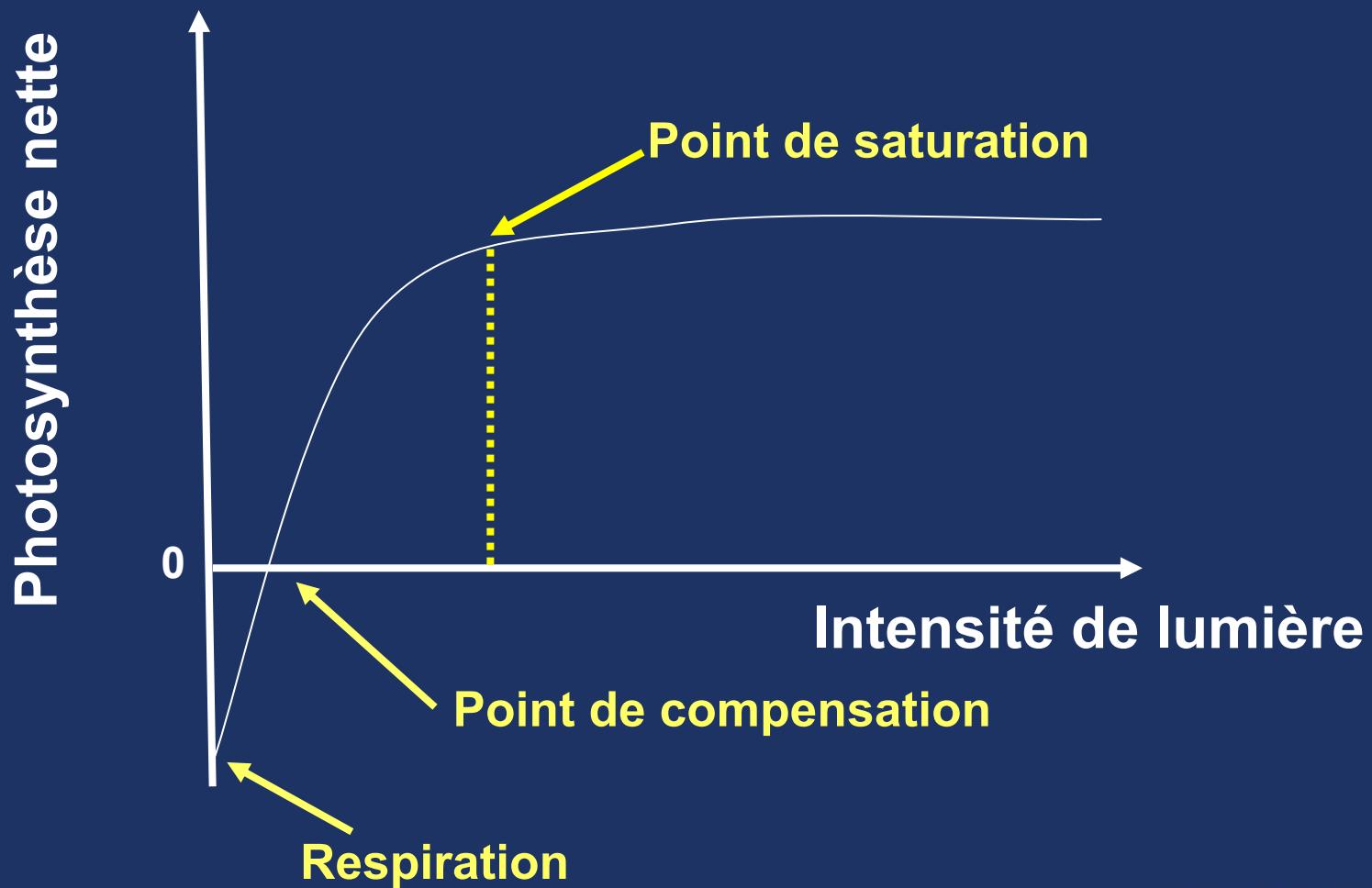
Rôle de la lumière en matière de croissance et de développement des plants

- **Rappel**
 - Lumière: plusieurs longueurs d'ondes
 - < 400 nm: Rayonnement ultraviolet (invisible)
 - 400 – 700 nm: Ray. photosynthétique actif (lumière visible)
 - > 700 nm: Rayonnement infrarouge (invisible)
- **Principaux effets biologiques de quelques longueurs d'onde**
 - 700-1000 nm (invisible): Élongation de la partie aérienne
 - 600-690 nm (rouge): Absorption chlorophylle, A_n, Jours longs (élevée)
 - 500-590 nm (orange, jaune, vert): Faible efficacité photosynthétique
 - 400-490 nm (bleu, violet): Absorption chlorophylle, A_n (modérée)
- **Principales propriétés de la lumière**
 - Intensité de la lumière
 - Durée de l'éclairement (photopériode)
 - Qualité de la lumière (Rouge 660nm/Rouge lointain 735nm)

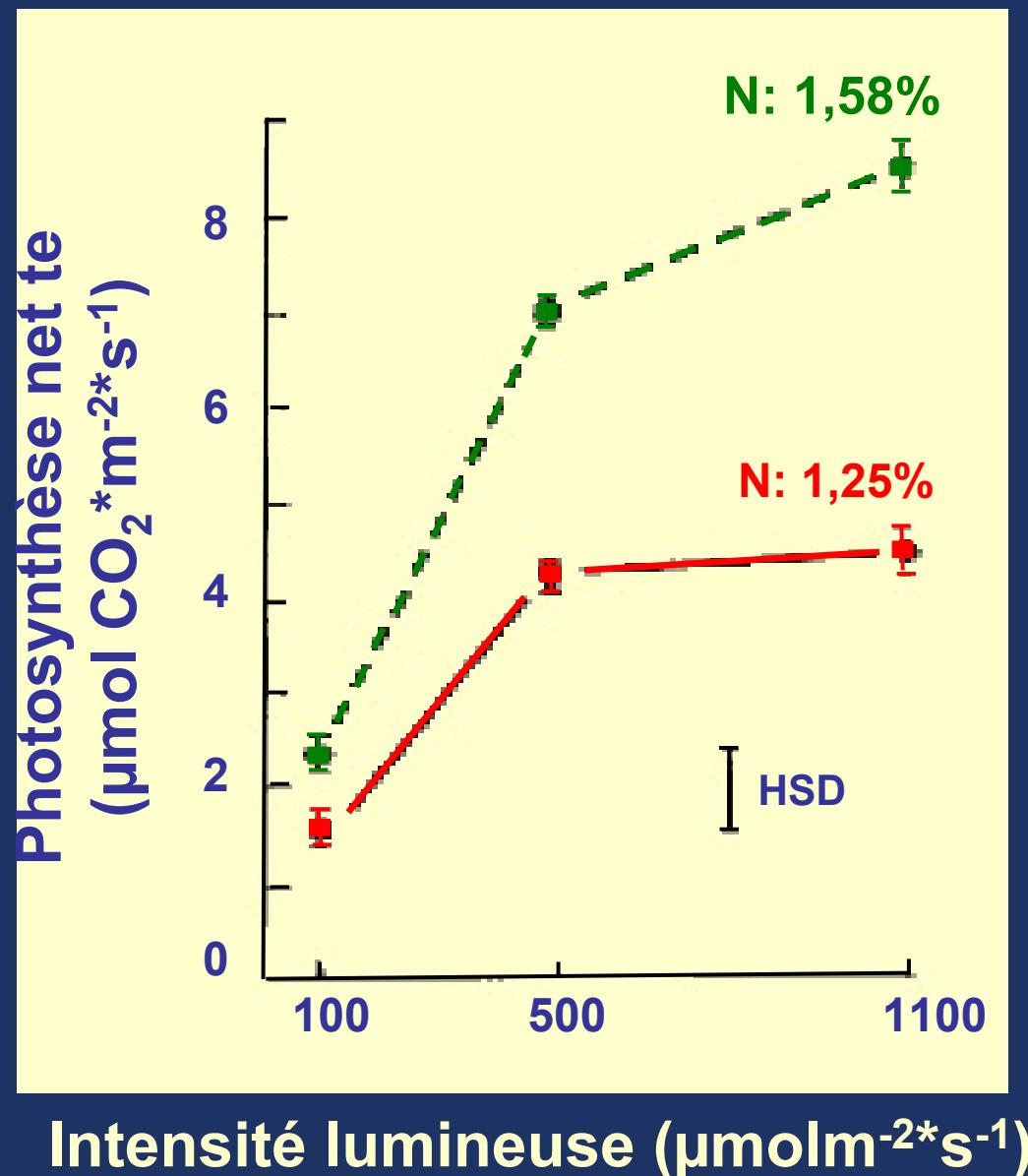
Sensibilité du phytochrome à la durée relative de la période sombre (Jours courts- Jours longs)



Effet de l'intensité de lumière sur la photosynthèse



Variations de la photosynthèse: Lumière et azote



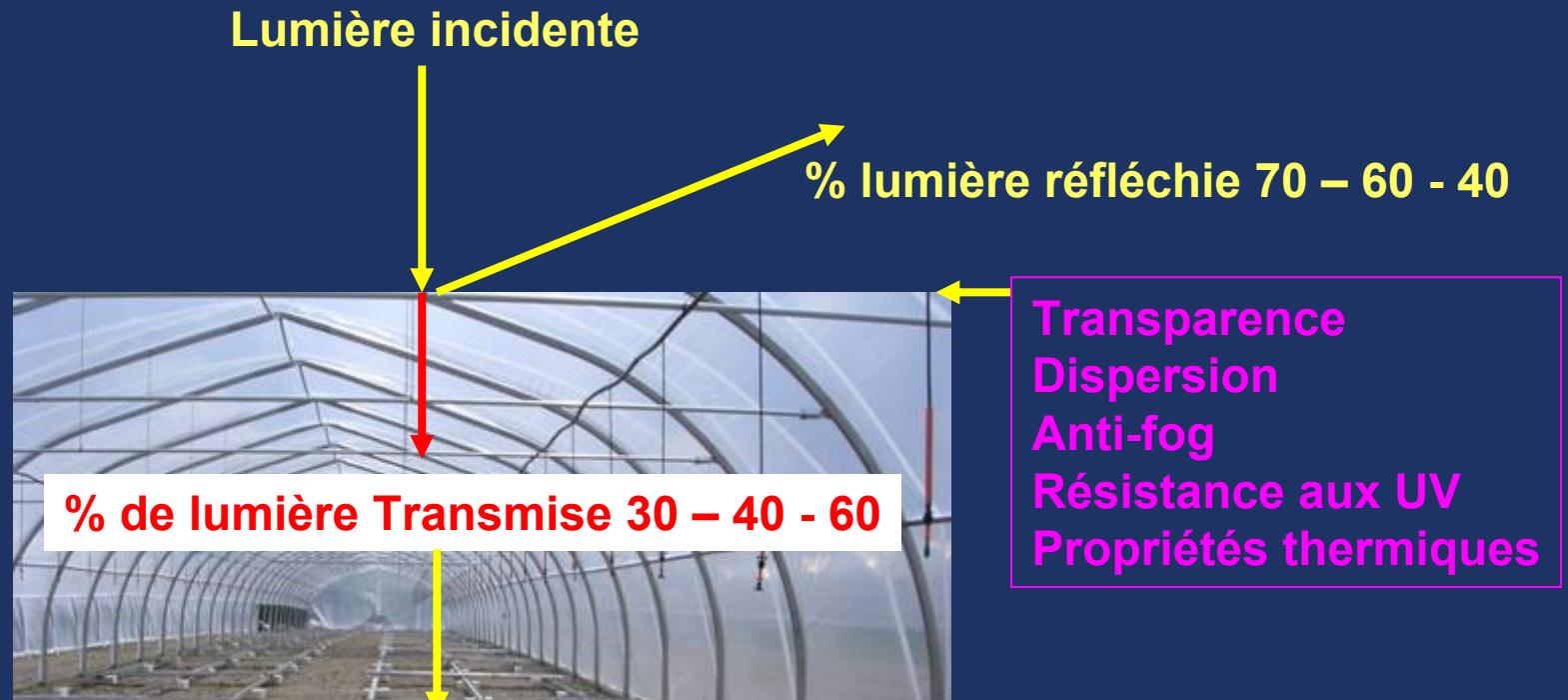
Pseudotsuga menziesii

Mitchell et Hinckley (1993)

Ressources naturelles
et Faune

Québec

Connaître les caractéristiques optiques du tunnel (serre) et de l'éclairage artificiel utilisés



Intensité de lumière à la hauteur des semis ???
Qualité de la lumière à la hauteur des semis ???
Variabilité spatiale de l'intensité de lumière ???



Faible intensité de lumière: Phototropisme



Pinus halepensis
Tunisie



Picea mariana
Production en hiver
Québec



Pinus sp.
Chine

Contrôle et optimisation de l'irrigation en pépinière forestière

Plants (1+0): Épinettes blanche et noire (sous tunnel)

Plants (2+0): Épinette blanche (extérieur et sous tunnel)

Lamhamedi et al. 2006. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 108-120.

Bergeron et al. 2004. Hort Sci. 39: 599-605.

Lamhamedi et al. 2003. Can. J. For. Res. 33: 279-291.

Lamhamedi et al. 2002. Cahiers Agricultures. 11: 275-283.

Lamhamedi et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212.

Stowe et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212.

Lamhamedi et al. 2001. Mem. Rech. For. N°138, 36p.

Carles, S. et al. 2006. Phase de soumission

Stowe et al. 2006. en rédaction.

Maîtrise de Bertrand (en cours)

Thèse de doctorat de Sylvie Carles (en cours)



Méthodes usuelles de contrôle de l'irrigation au Québec

Rélectométrie dans le domaine temporel: MP-917



Autres méthodes de contrôle de l'irrigation

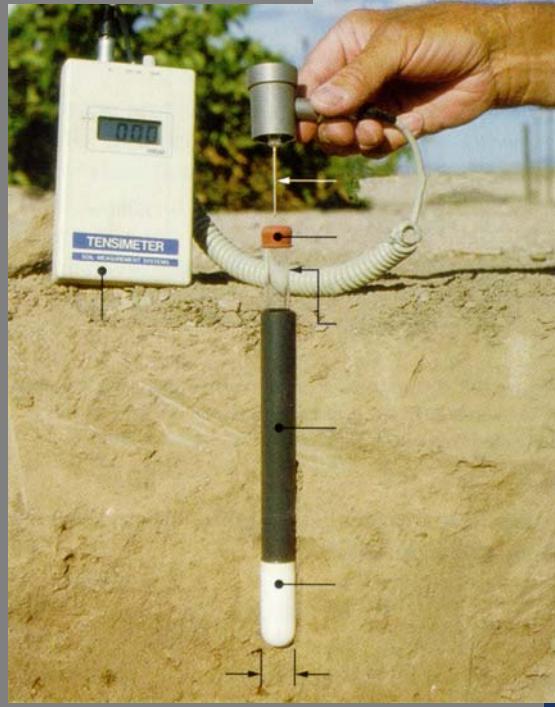
Chambre à pression



Photo: M.S. Lamhamadi

Photo: M. Renaud

Tensiomètre



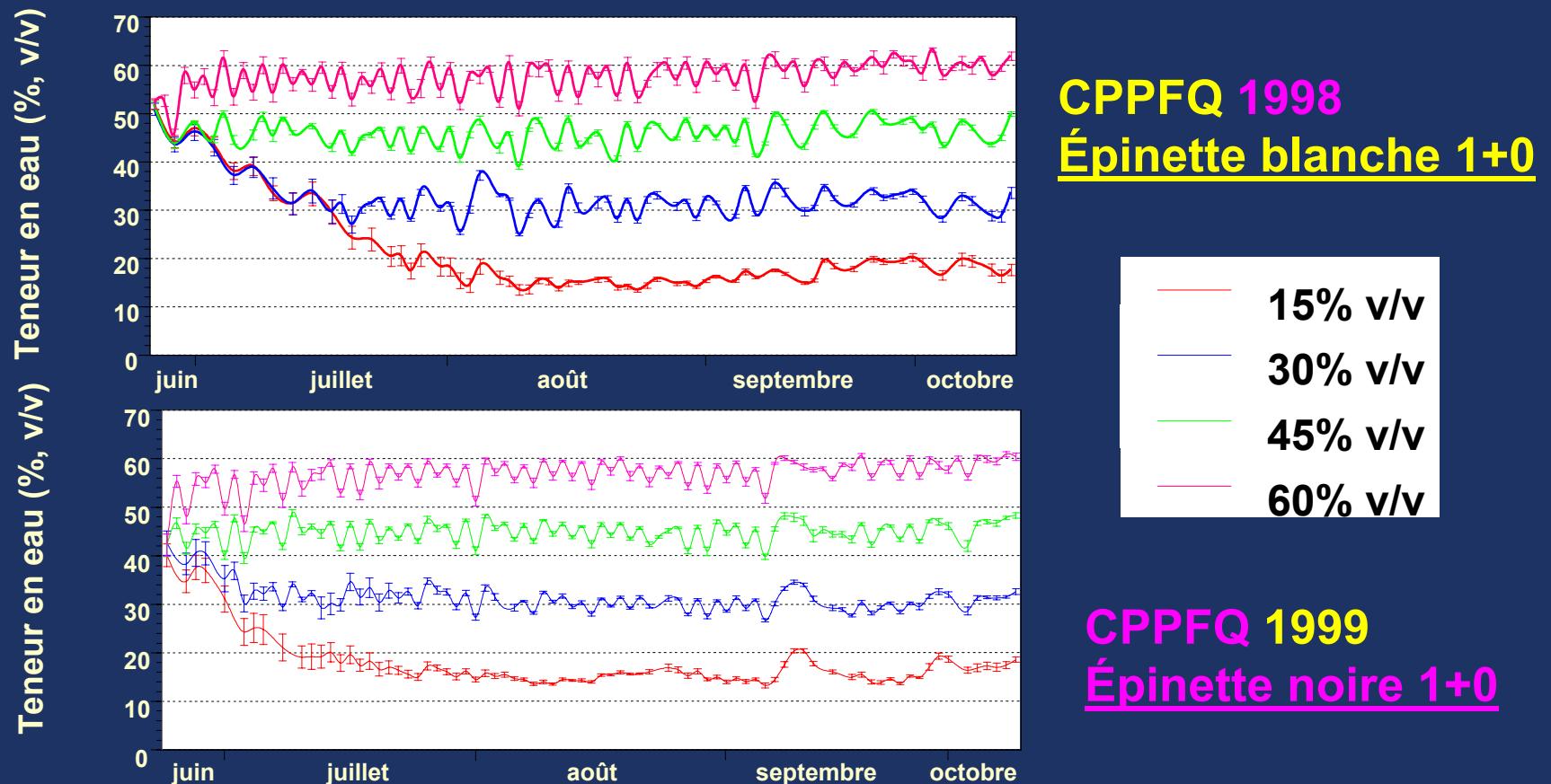
Variables évaluées

Plants (1+0): Épinette blanche et épinette noire

- Teneurs en eau et quantité d'eau utilisée
- Variables environnementales
- Variables morphologiques
- Statut nutritionnel des plants
- Échanges gazeux
- Architecture des racines
- Lessivage des minéraux
- Relations hydriques
- Cinétique et caractérisation des bourgeons
- Traits cireux épicuticulaires



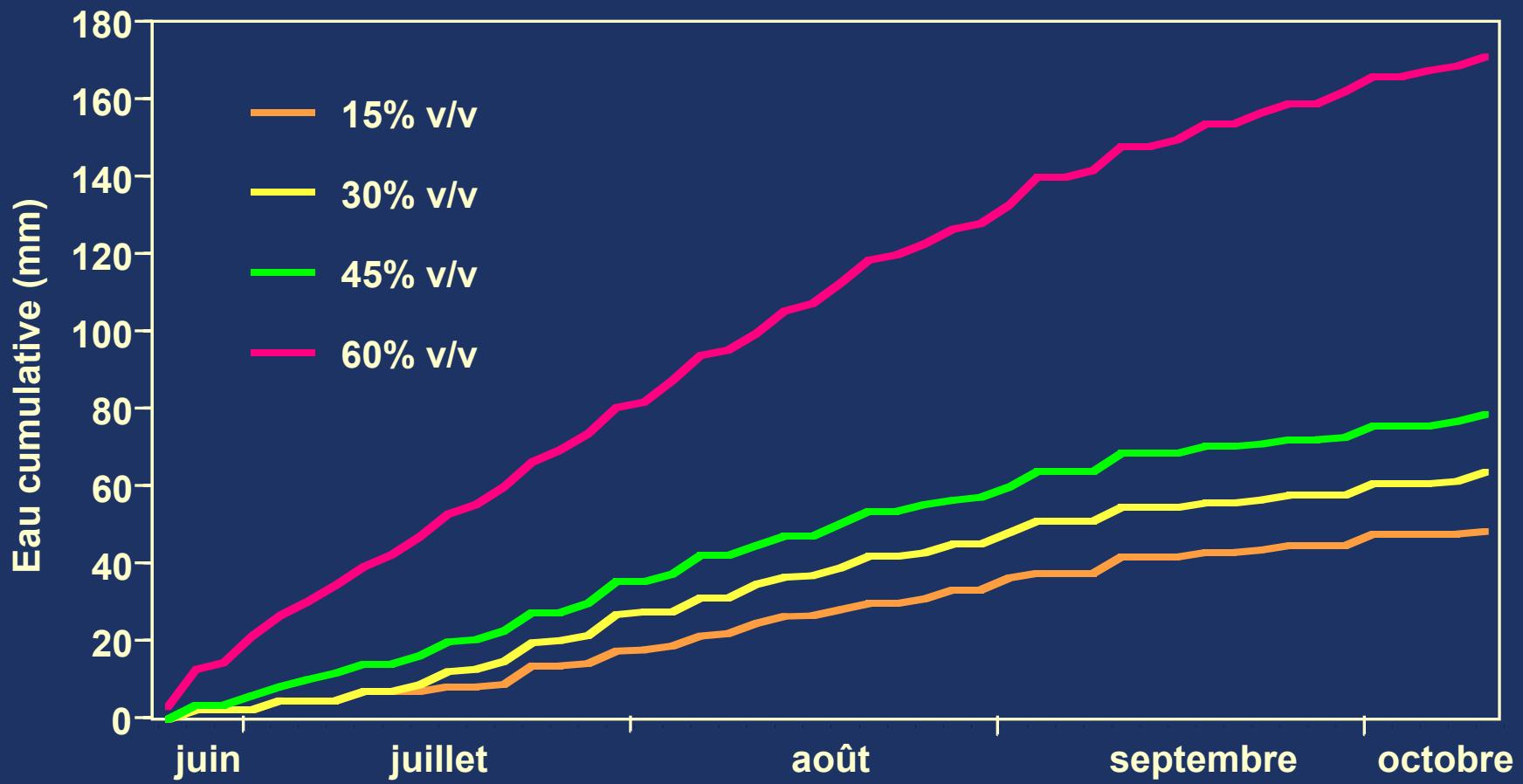
Maintien de quatre régies d'irrigation différentes sous tunnel



Lamhamedi *et al.* 2003. Can. J. For. Res. 33: 279-291

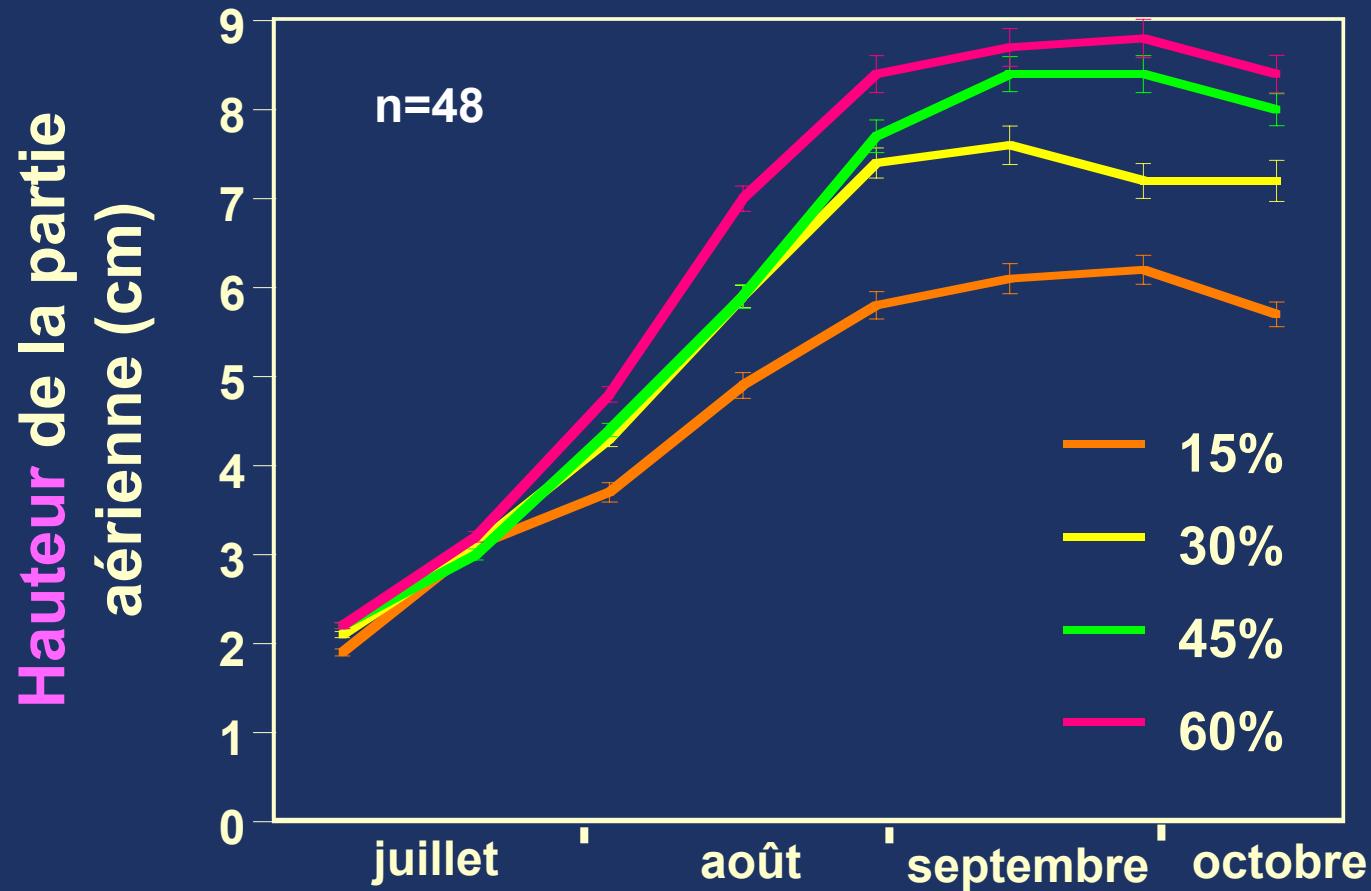
Lamhamedi *et al.* 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212

Quantité d'eau utilisée pour les quatre régies d'irrigation: Épinette blanche (1+0)



Lamhamedi *et al.* 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212

Épinette blanche (1+0)

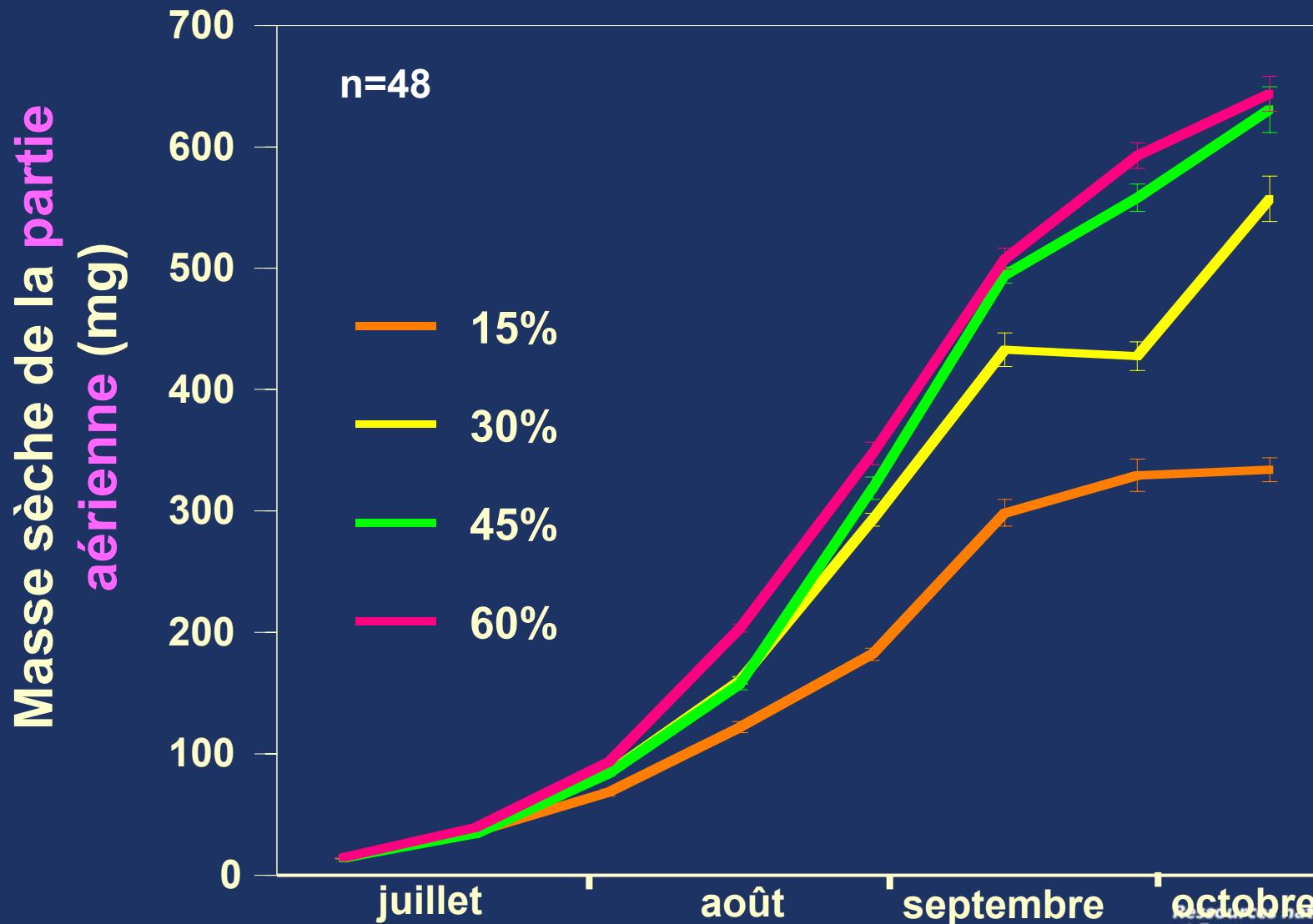


Lamhamedi et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212

Ressources naturelles
et Faune

Québec

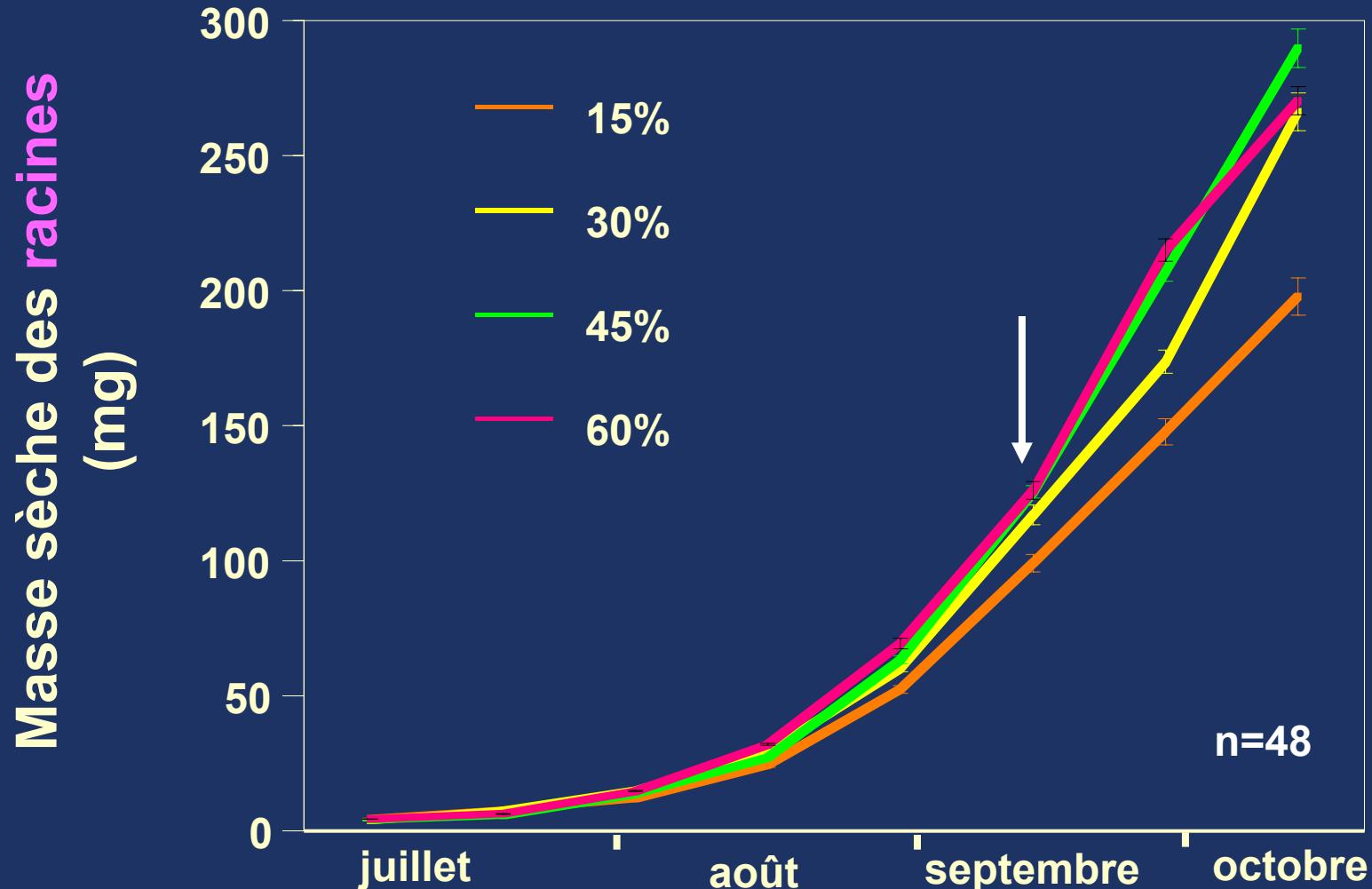
Épinette blanche (1+0)



Lamhamedi et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212

Ressources naturelles
et Faune
Québec

Épinette blanche (1+0)

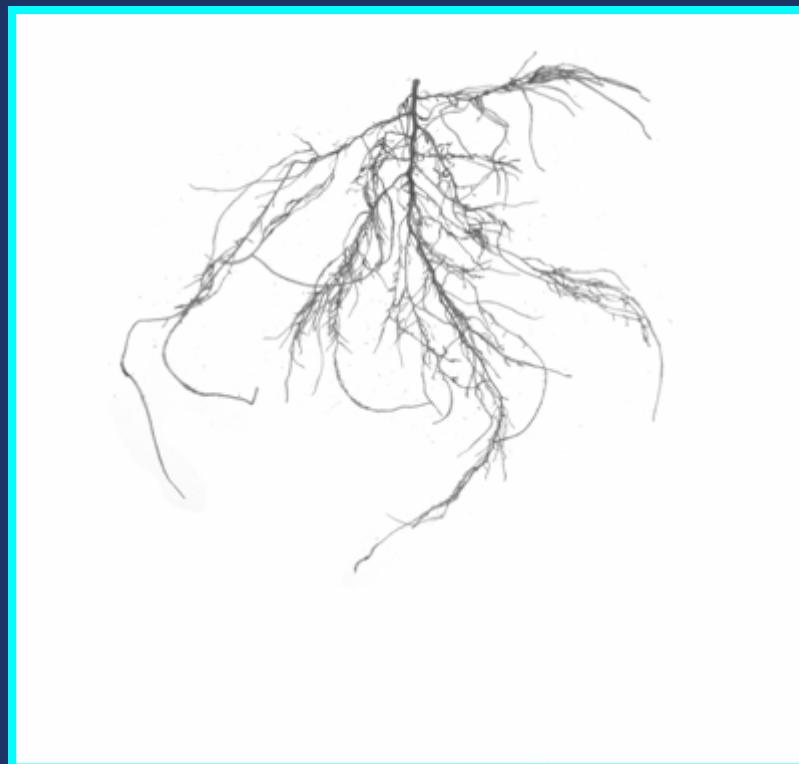


Lamhammedi et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212

Ressources naturelles
et Faune

Québec

Architecture du système racinaire: Numérisation à l'aide du logiciel de Win Rhizo Épinette blanche (1+0)



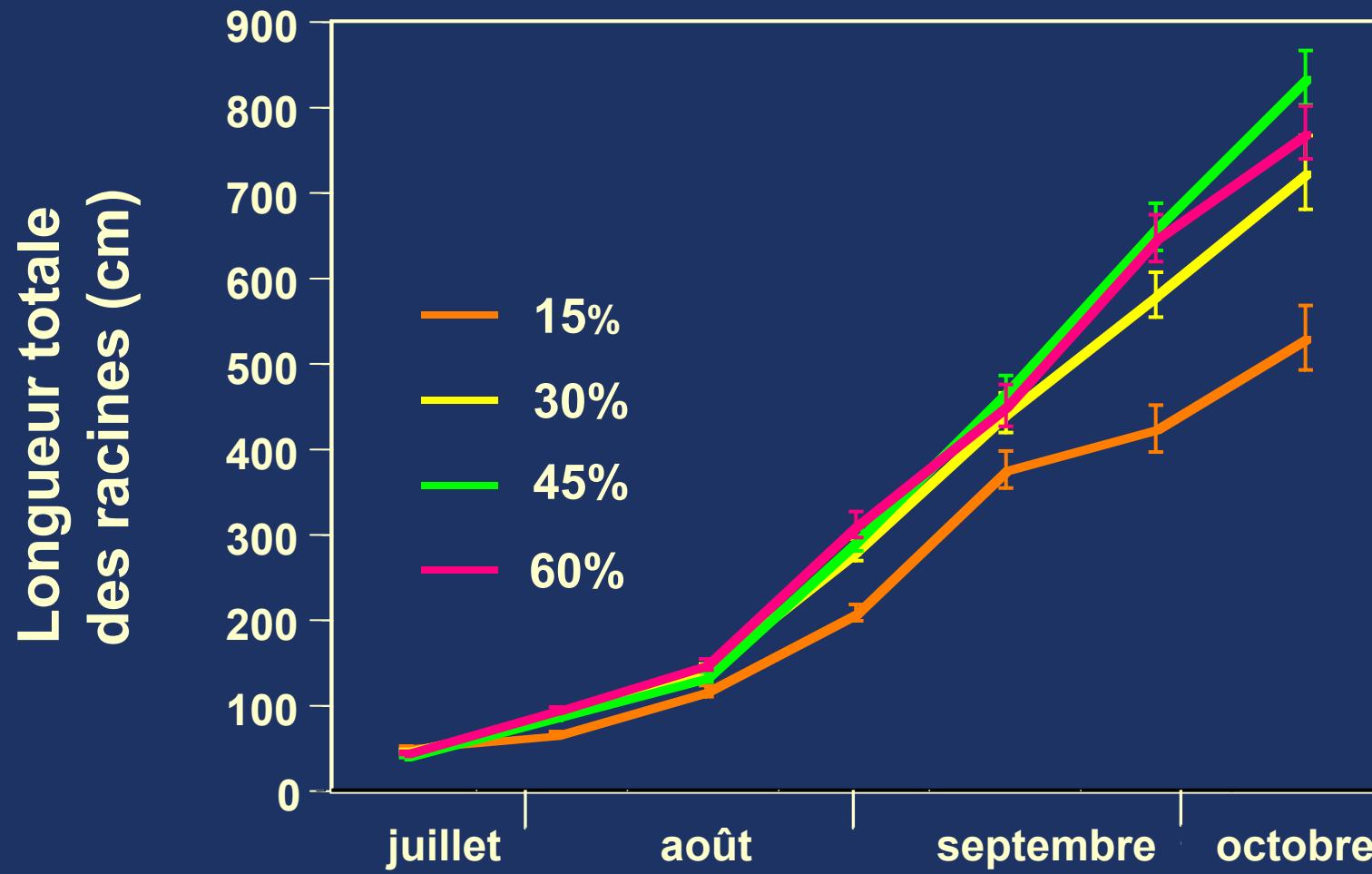
15% (v/v)



60% (v/v)

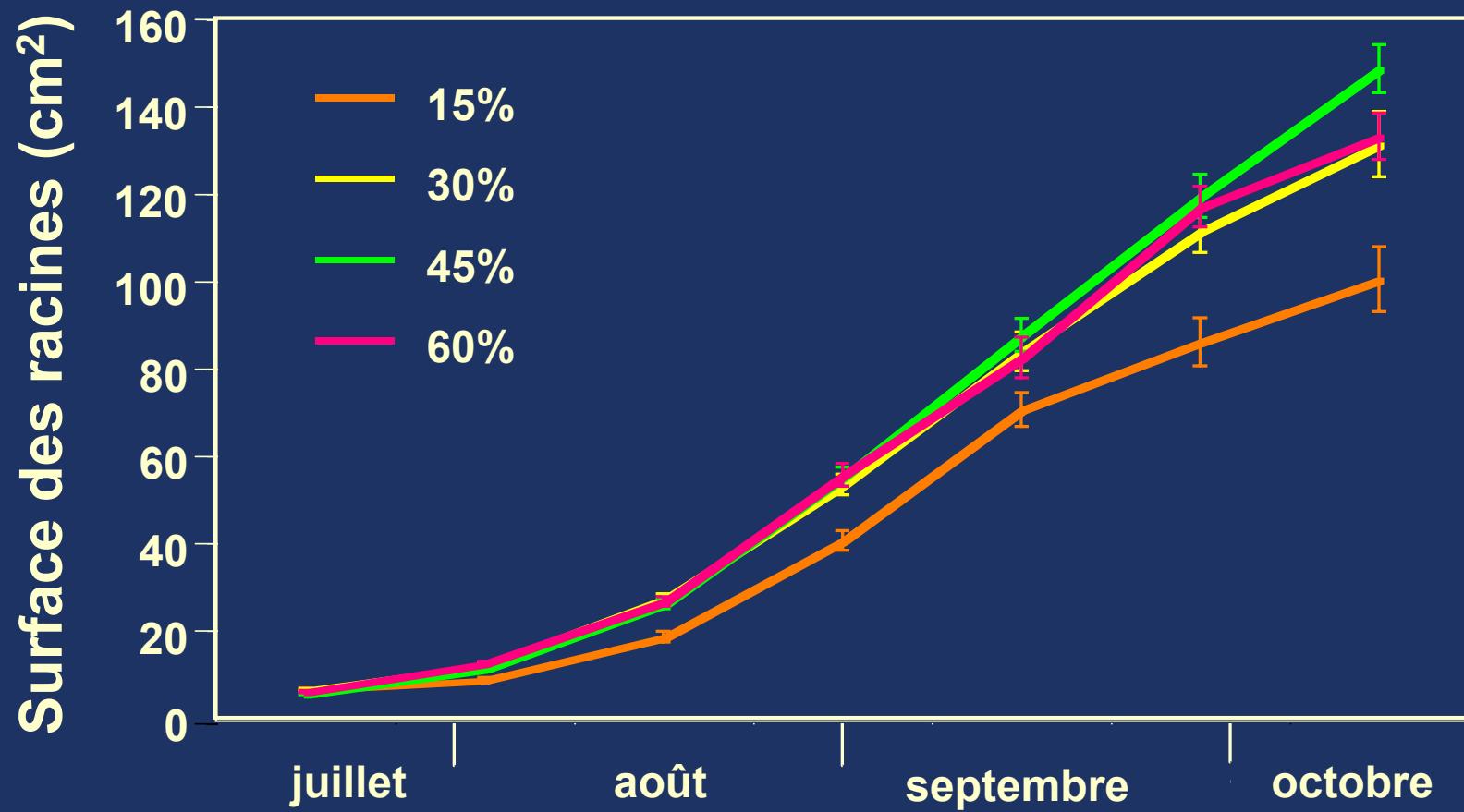
Date : 13 octobre 1998

Épinette blanche (1+0)



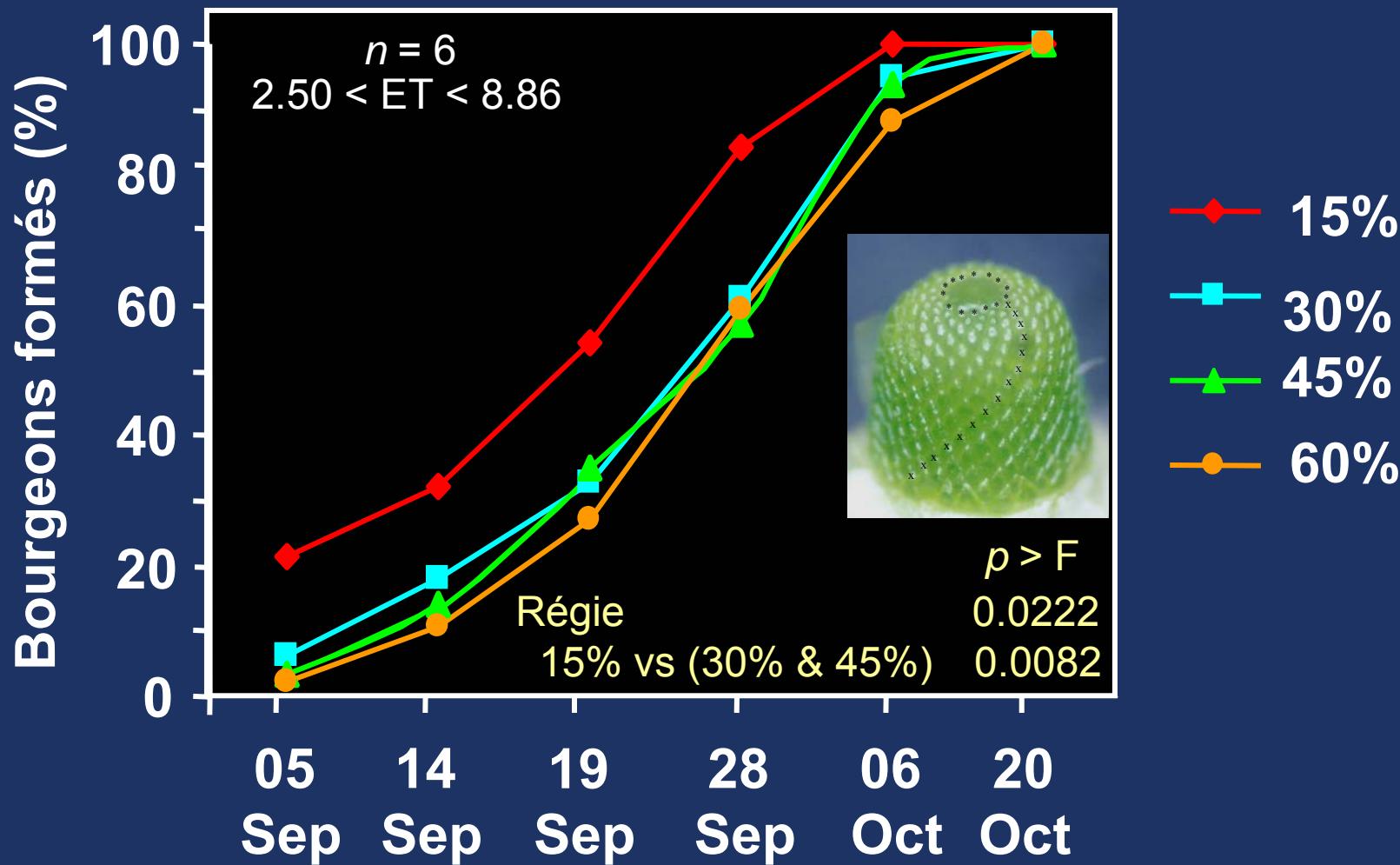
Lamhamedi et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212

Épinette blanche (1+0)



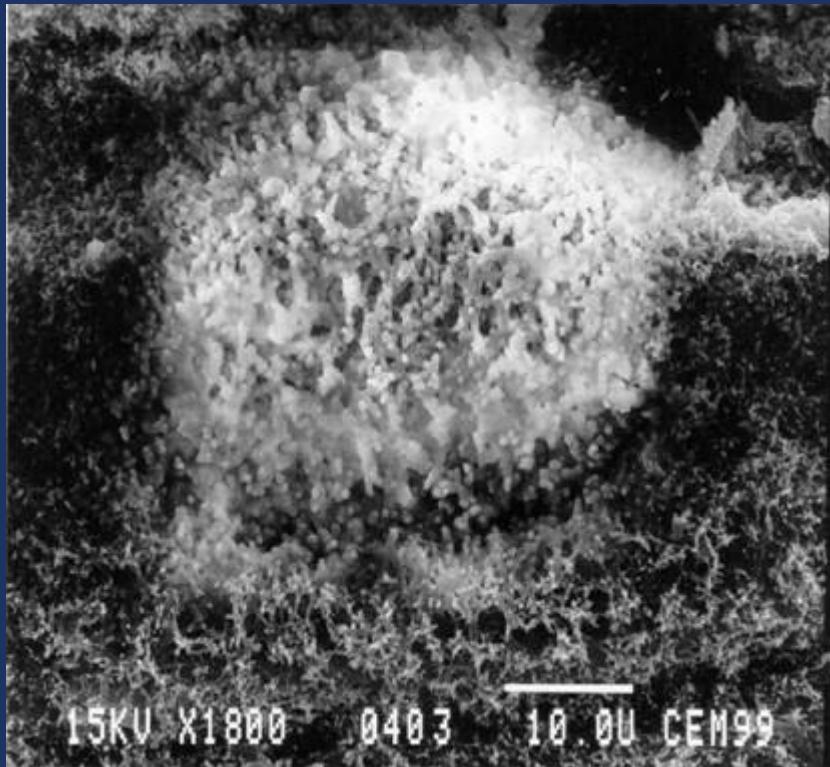
Lamhamedi et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212

Cinétique de la formation des bourgeons

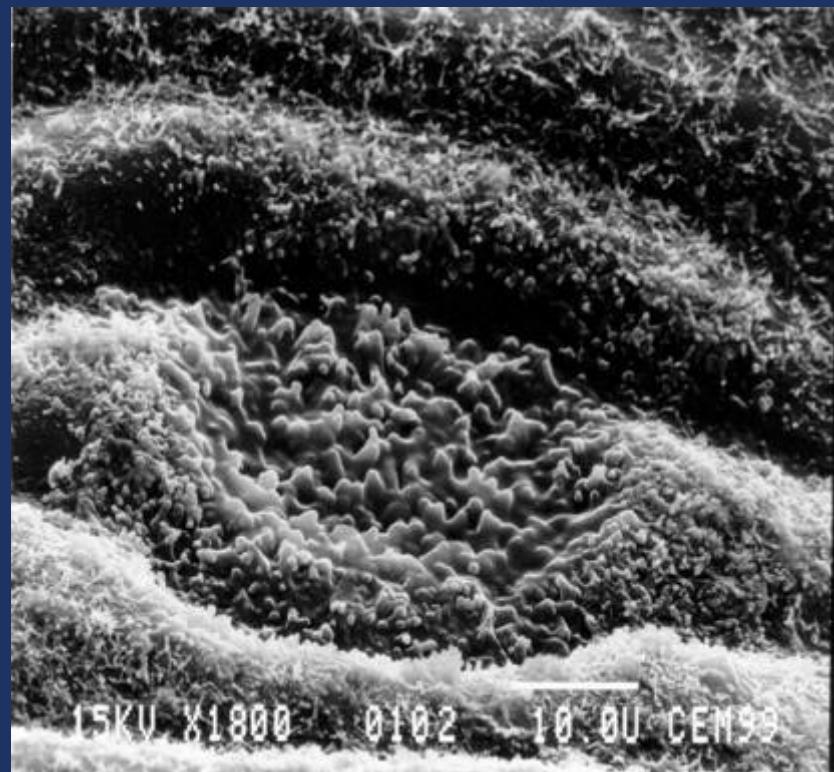


Stowe et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212.

Cires épicuticulaires observées à la surface des aiguilles



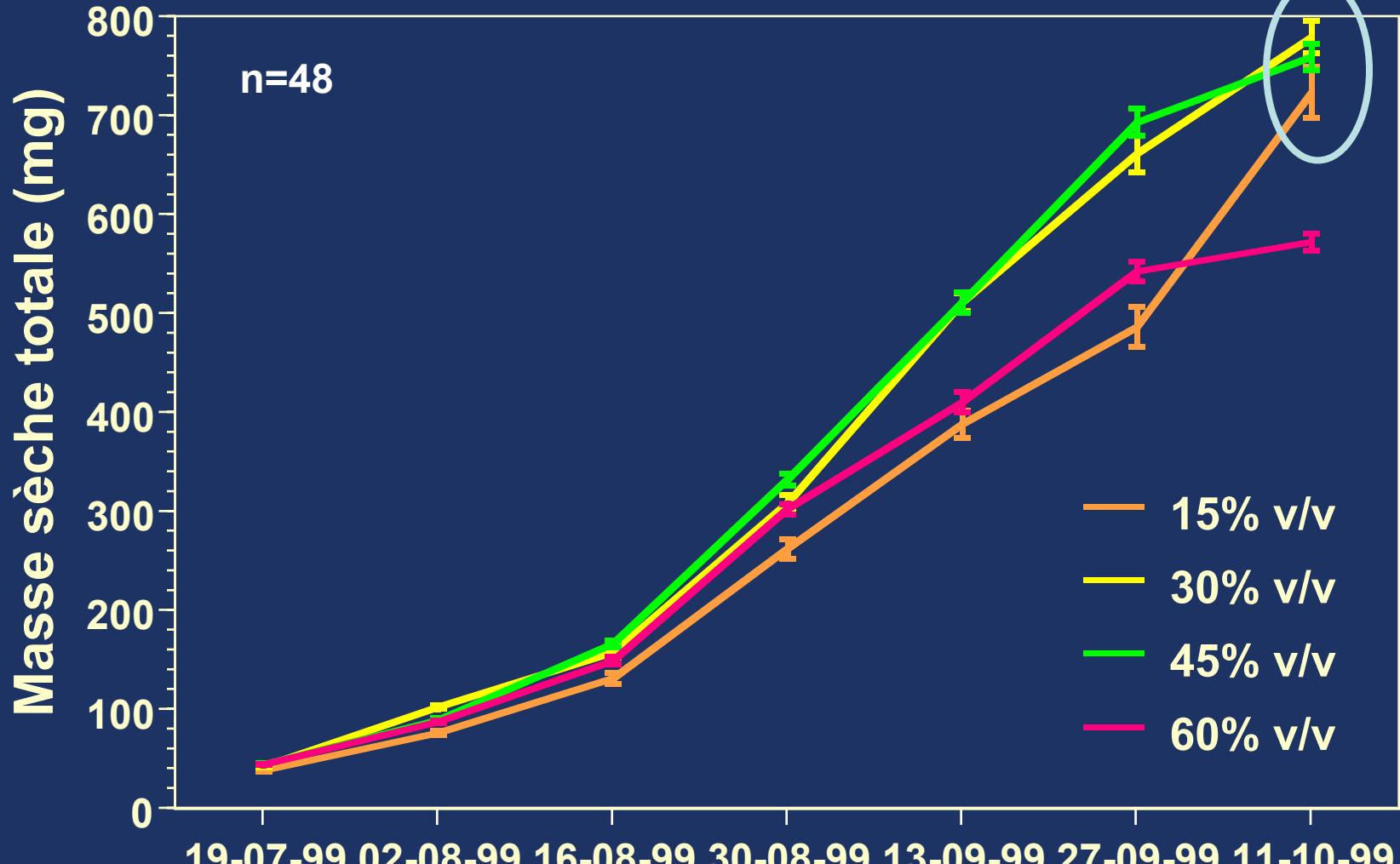
15%



60%

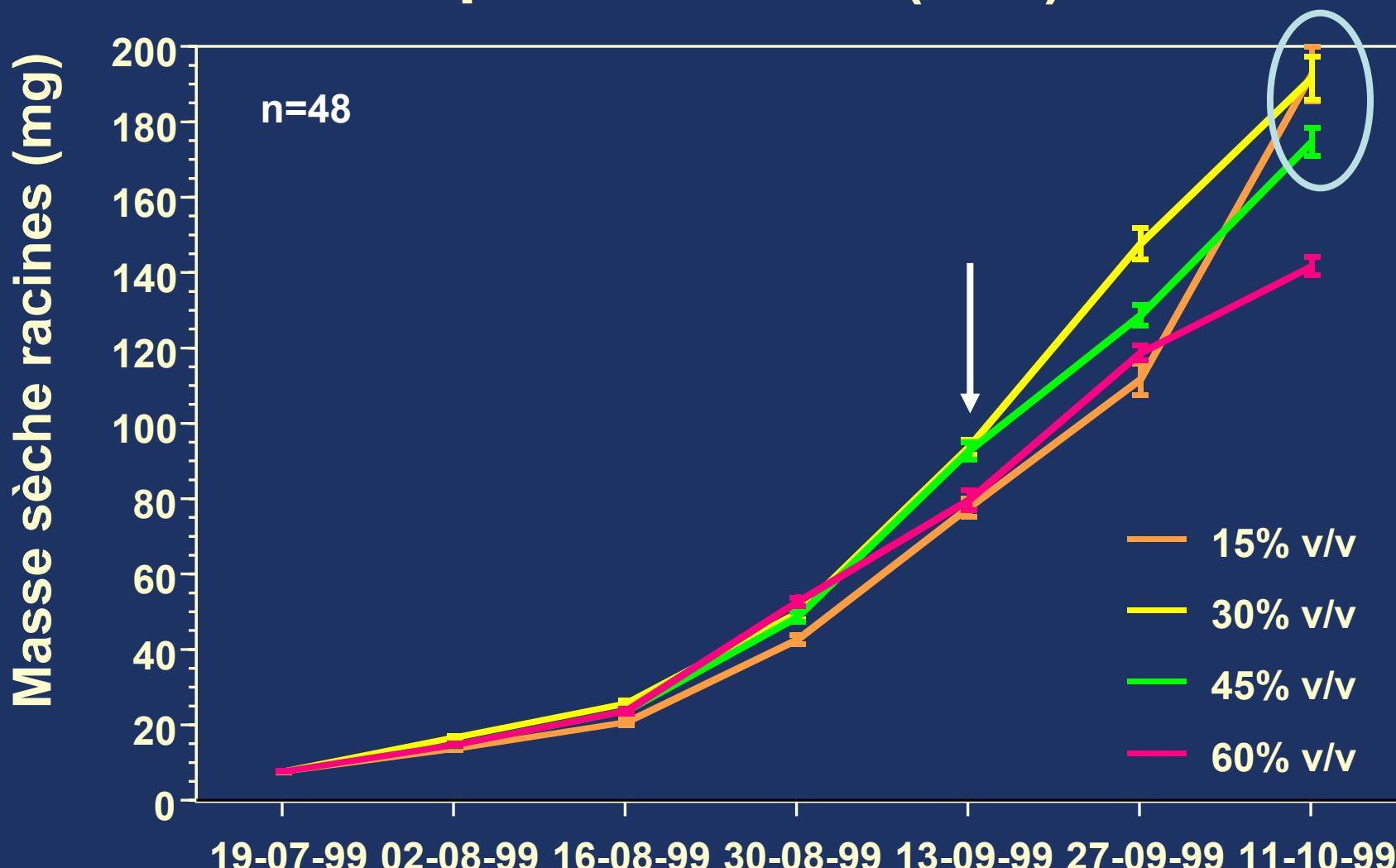
Stowe et al. 2001. Can. J. For. Res. 31: 2200-2212.

Épinette noire (1+0)



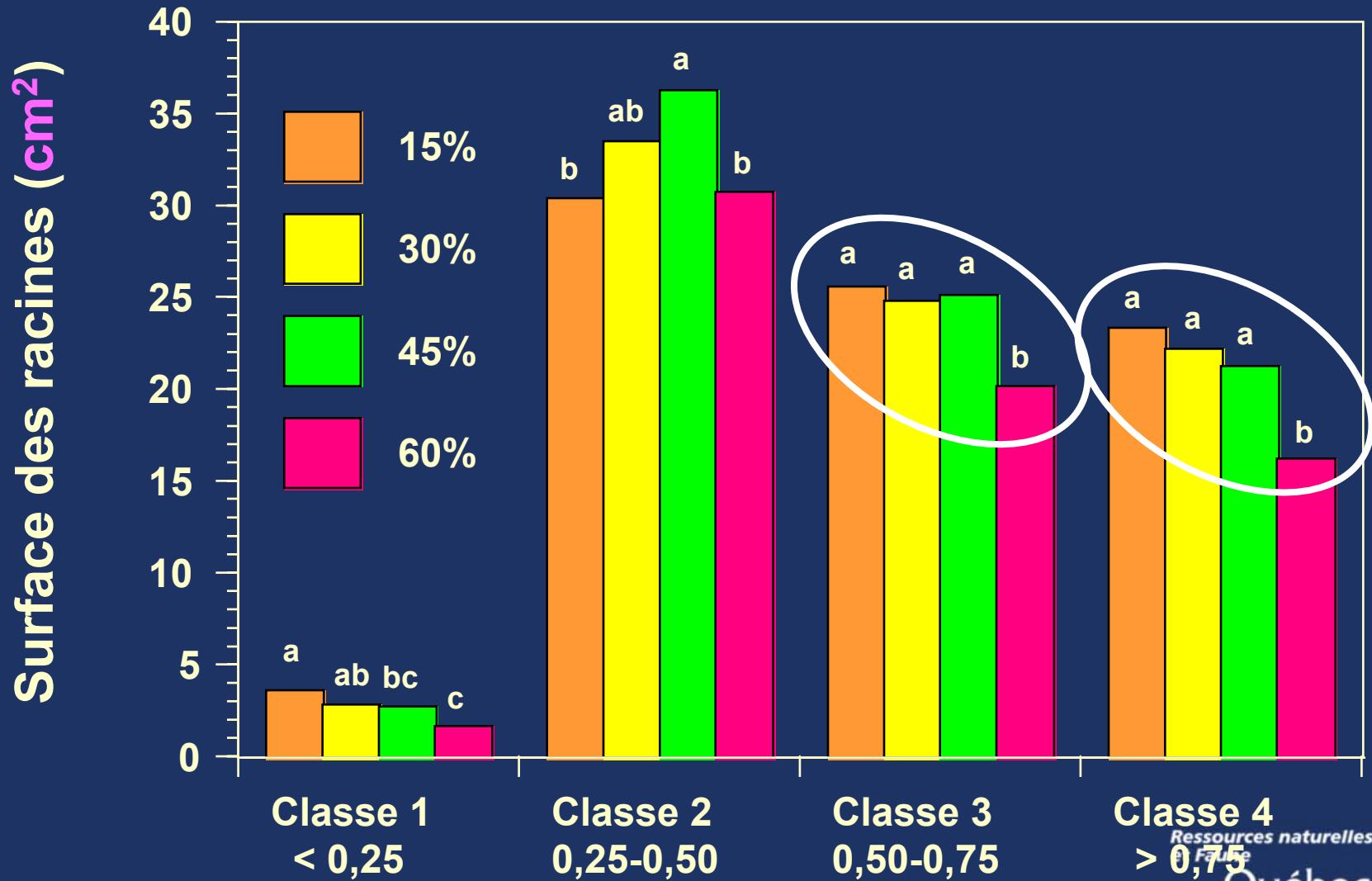
Lamhammedi et al. 2003. Can. J. For. Res. 33: 279-291

Épinette noire (1+0)



Lamhammedi et al. 2003. Can. J. For. Res. 33: 279-291

Épinette noire (1+0)



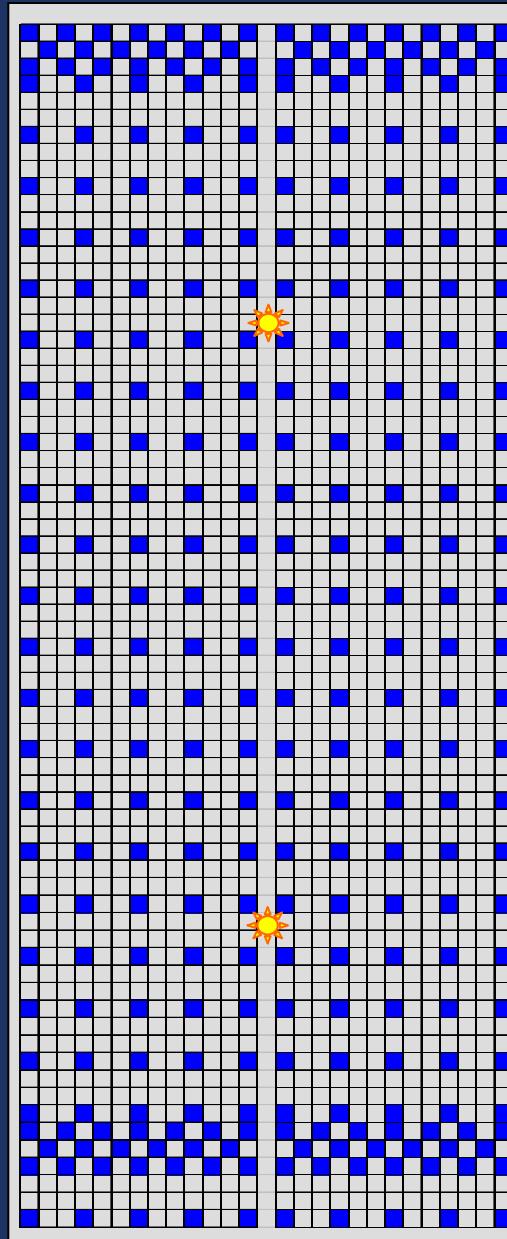
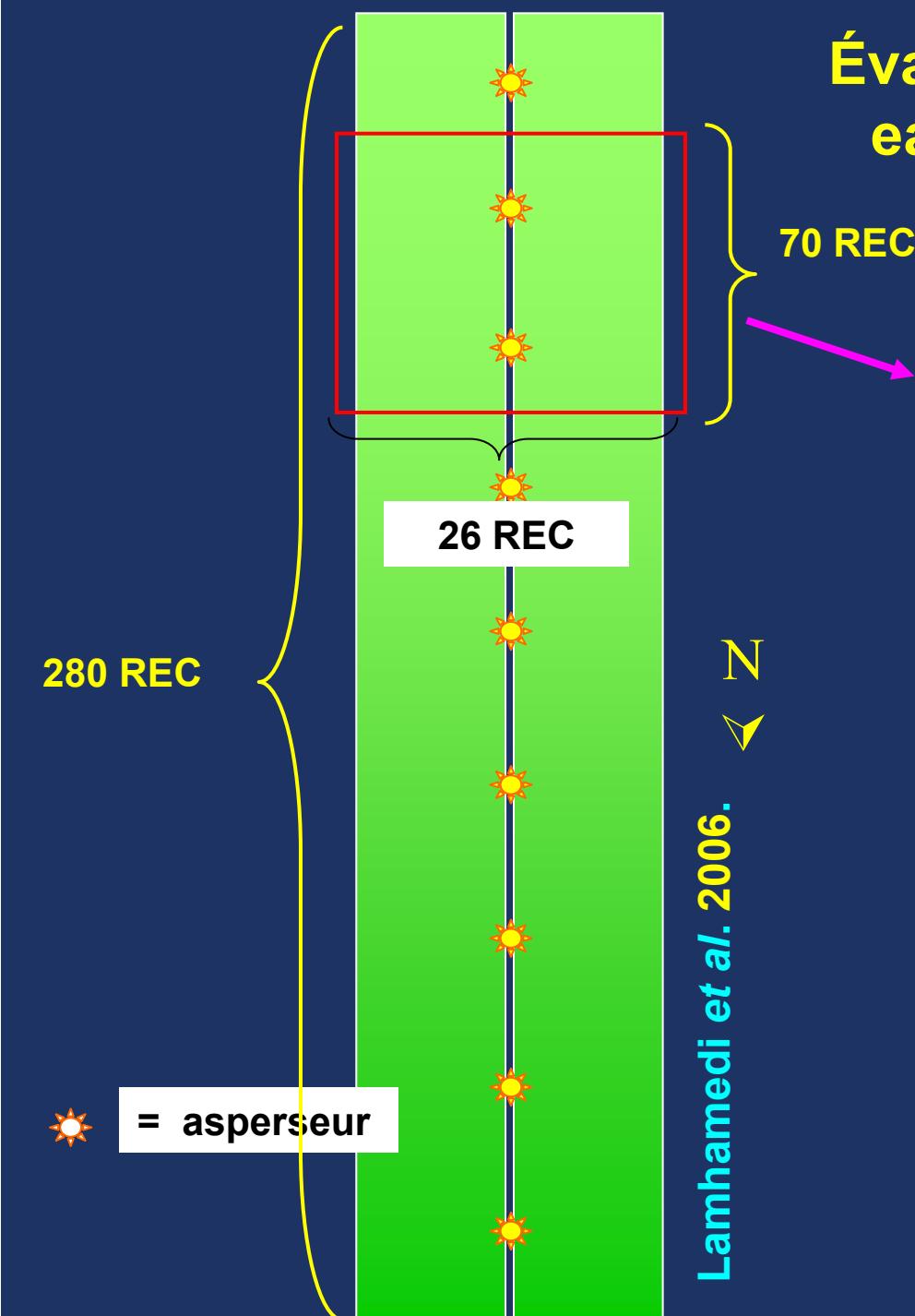
Variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat: Approche géostatistique

- Est-ce que l'absence d'uniformité dans la croissance des plants **d'épinette blanche (2+0)** est reliée à la variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat générée par les asperseurs?



Photo. D. Lavallé

Évaluation des teneurs en eau et de la croissance



Variabilité spatiale des teneurs en eau

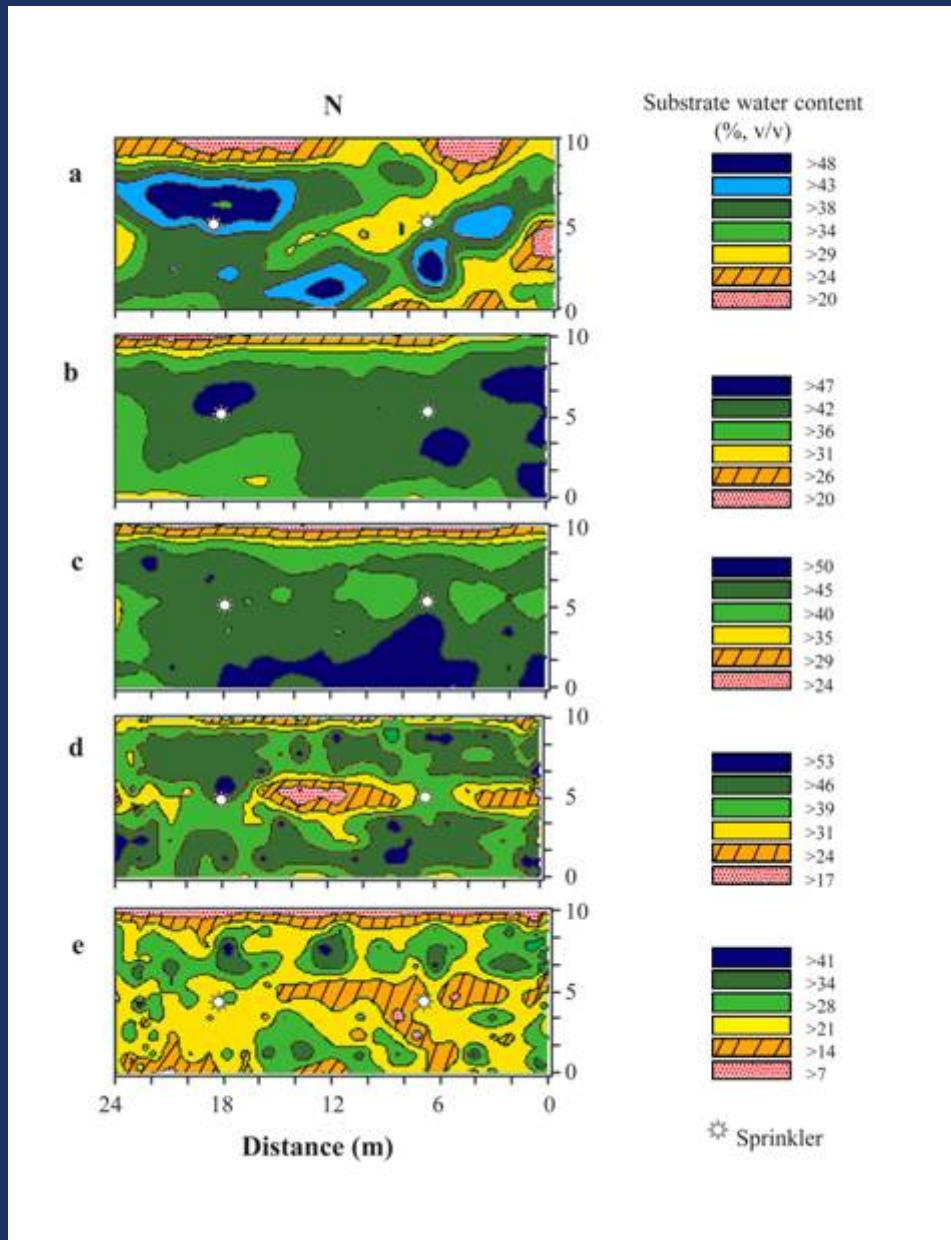
12 Juin 2001

27 Juin 2001

11 Juillet 2001

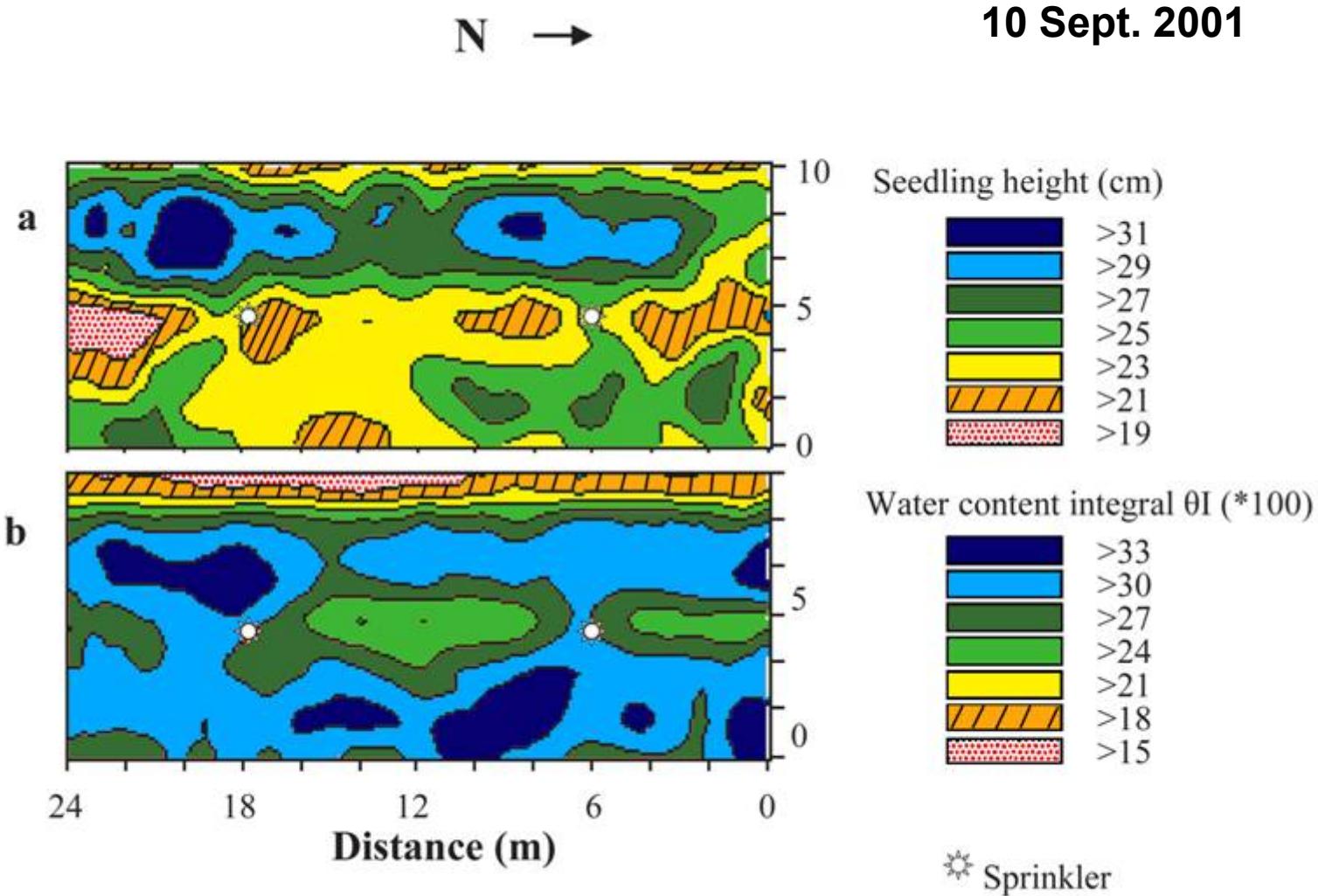
11 Août 2001

10 Sept. 2001



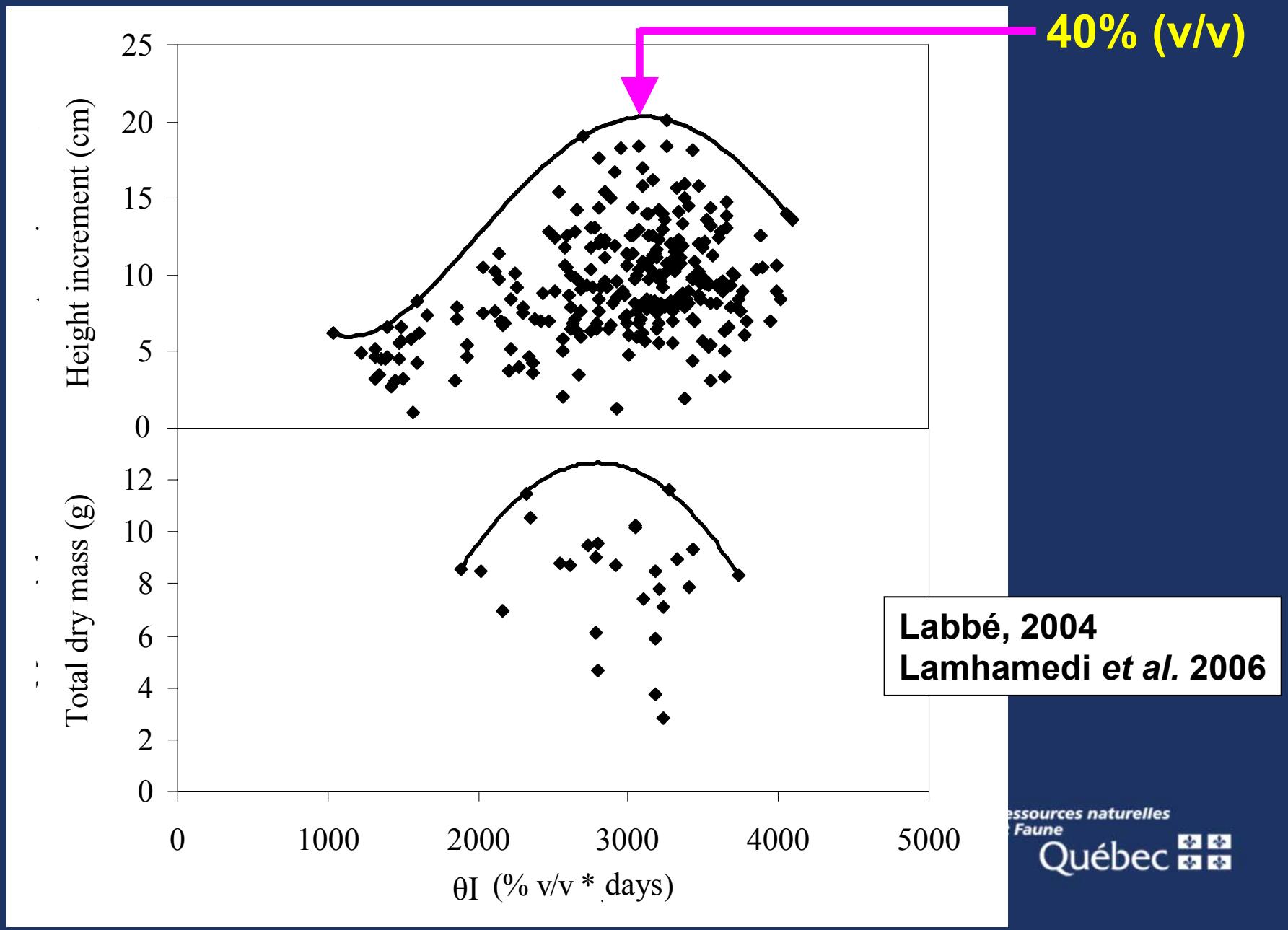
Lamhamedi et al. 2006.
Soil Sci. Soc. Am. J.
70: 108-120

Variabilité spatiale de la hauteur et θI



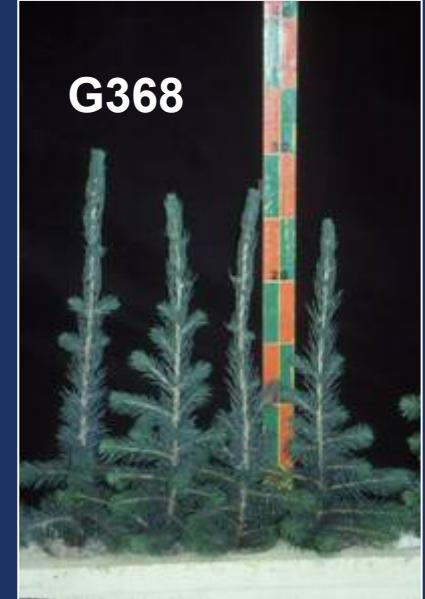
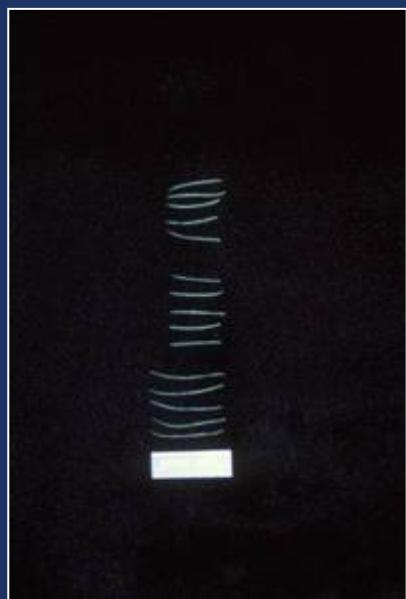
Lamhamedi et al. 2006. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 108-120

Épinette blanche (2+0) à l'extérieur



Variabilité de la croissance chez l'épinette blanche (2+0)

- très grande sensibilité aux variations des teneurs en eau du substrat
- Variabilité clonale très prononcée chez l'épinette blanche (**1 graine = 1 clone**).



Lamhamedi *et al.* *Tree Physiol.* (2000) 20: 869-880

Québec 

Épinette blanche (2+0) sous tunnel

Maîtrise de Bertrand Fecteau
Projet en réseau, Dr. Hank Margolis



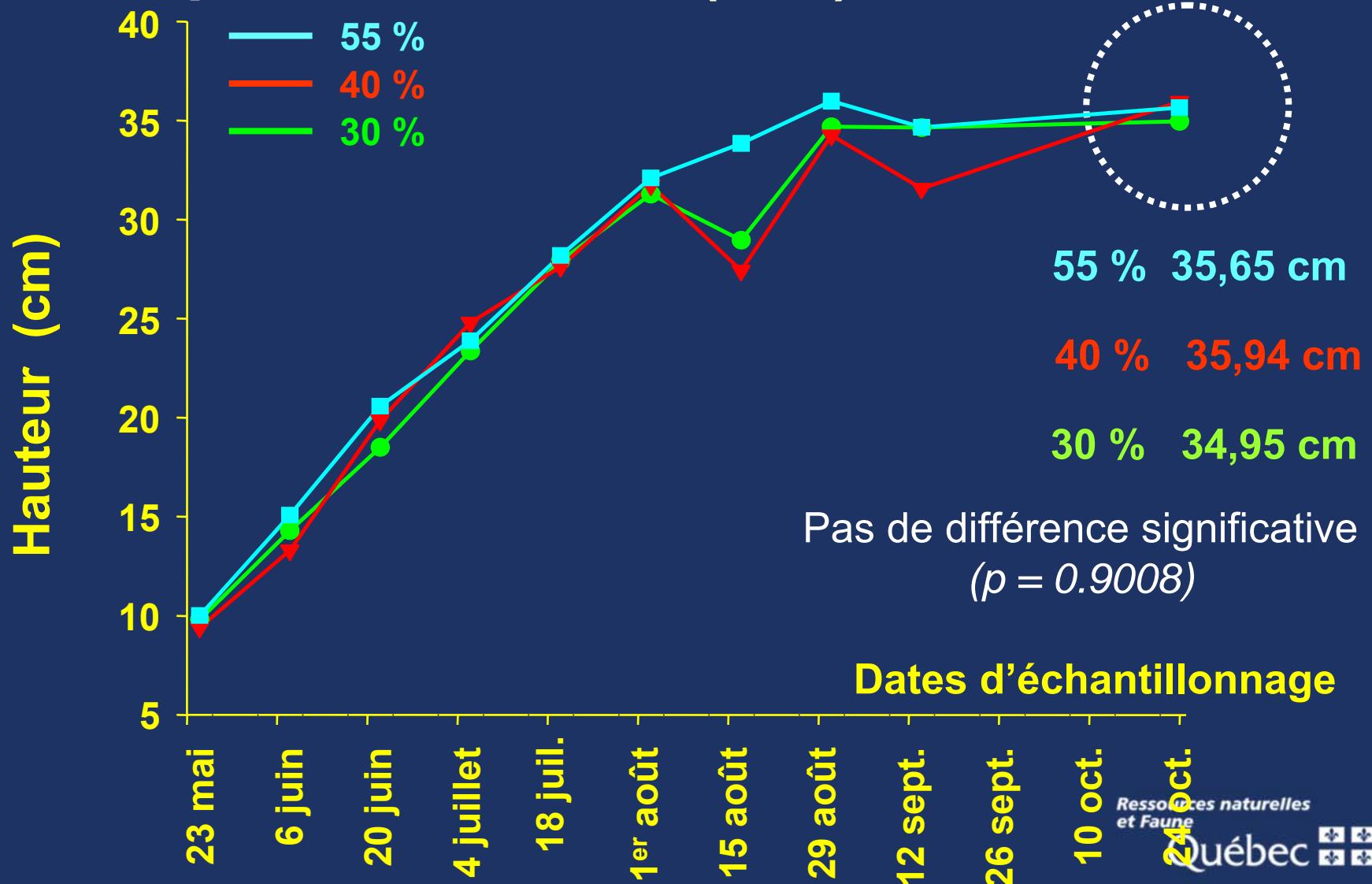
Doctorat de Sylvie Carles
Projet en réseau, Dr. Hank Margolis



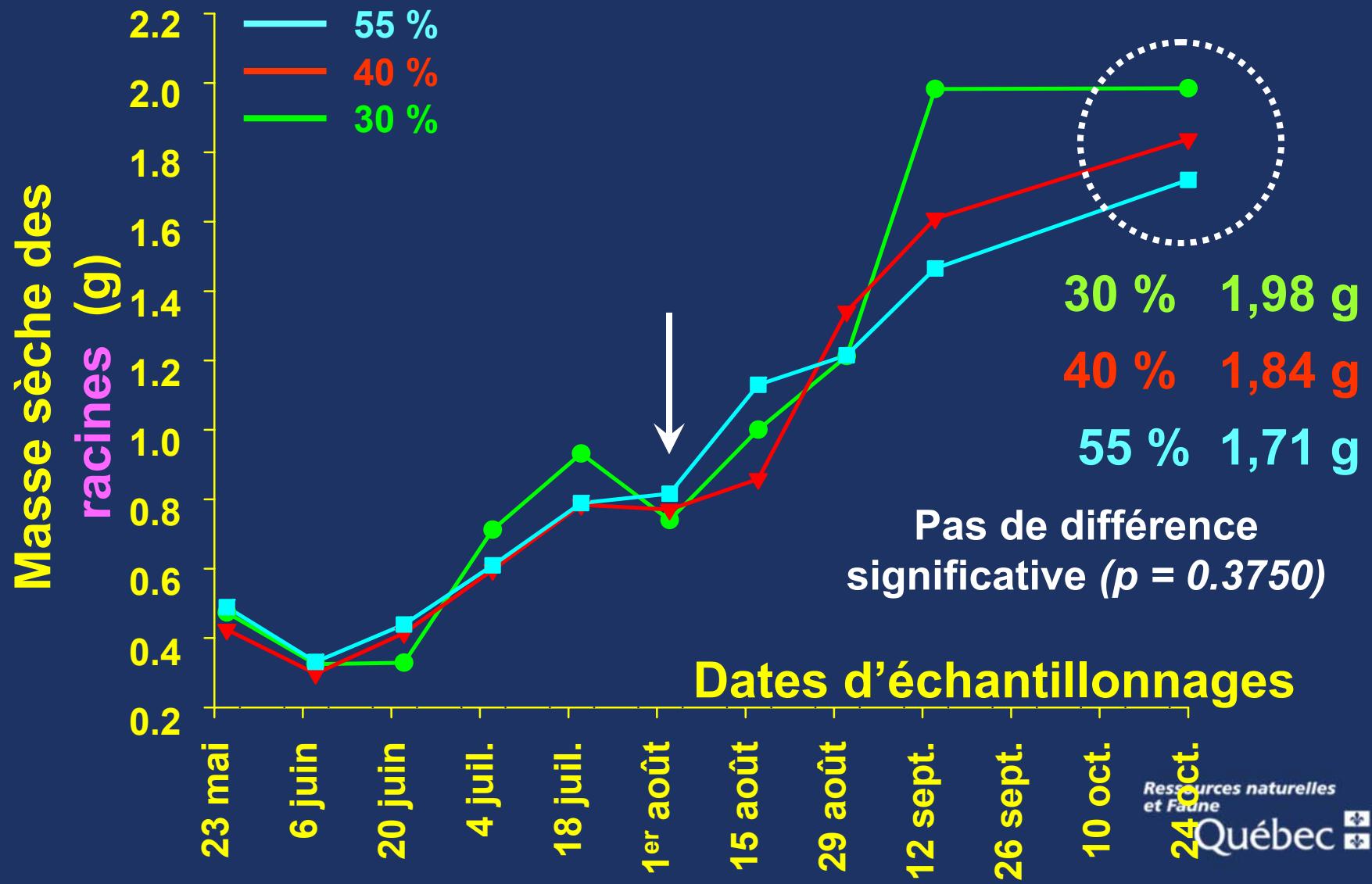
Photos : Bertrand Fecteau

- Déterminer à partir de quel niveau d'irrigation (30%, 40% ou 55%, v/v) la teneur en eau du substrat a un effet sur les variables morphophysiologiques des plants d'épinette blanche (2+0) produits sous tunnel.
- Élaborer des modèles mathématiques qui permettent l'estimation des ratios de lessivage entre les différents éléments minéraux.

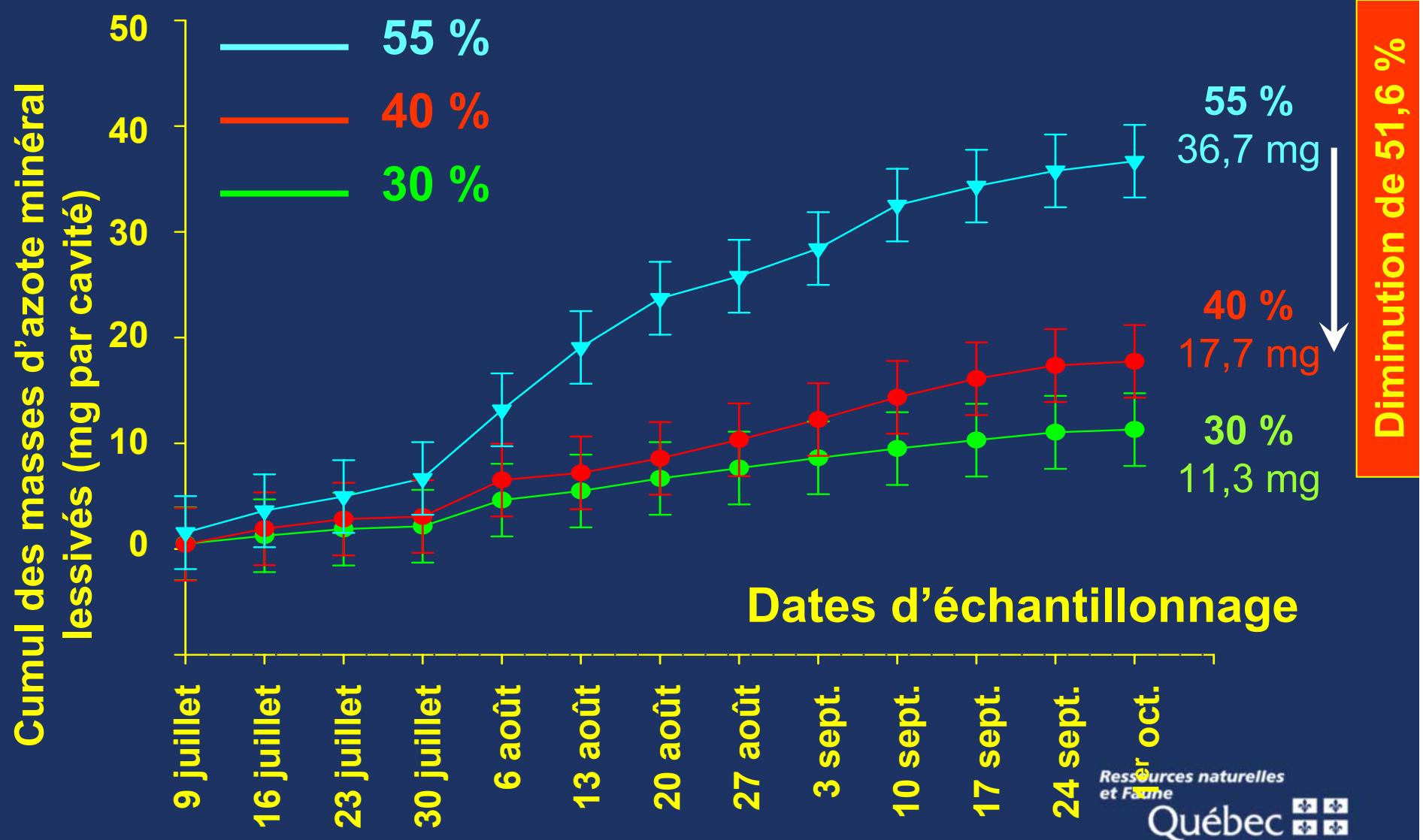
Croissance en hauteur Épinette blanche (2+0) sous tunnel



Massé sèche des racines Épinette blanche (2+0) sous tunnel



Perte par lessivage de l'azote Épinette blanche (2+0) sous tunnel



Gel hâtif & Gel tardif: Aucun contrôle sur le microclimat de la pépinière



Photos: B. Fecteau



- Excès d'eau
- Nécessité d'utiliser les supports

Exemples d'indicateurs d'excès d'eau (Irrigation & précipitations)



Racines d'eau
DPSP, MRNF

Engorgement & Saturation

Baisse d'O₂
(Conc. Interne)

↑ C.I. Ethylène

↑ Prod. Ethylène

Augmentation de la sensibilité *Thelephora terrestris*
aux auxines endogènes

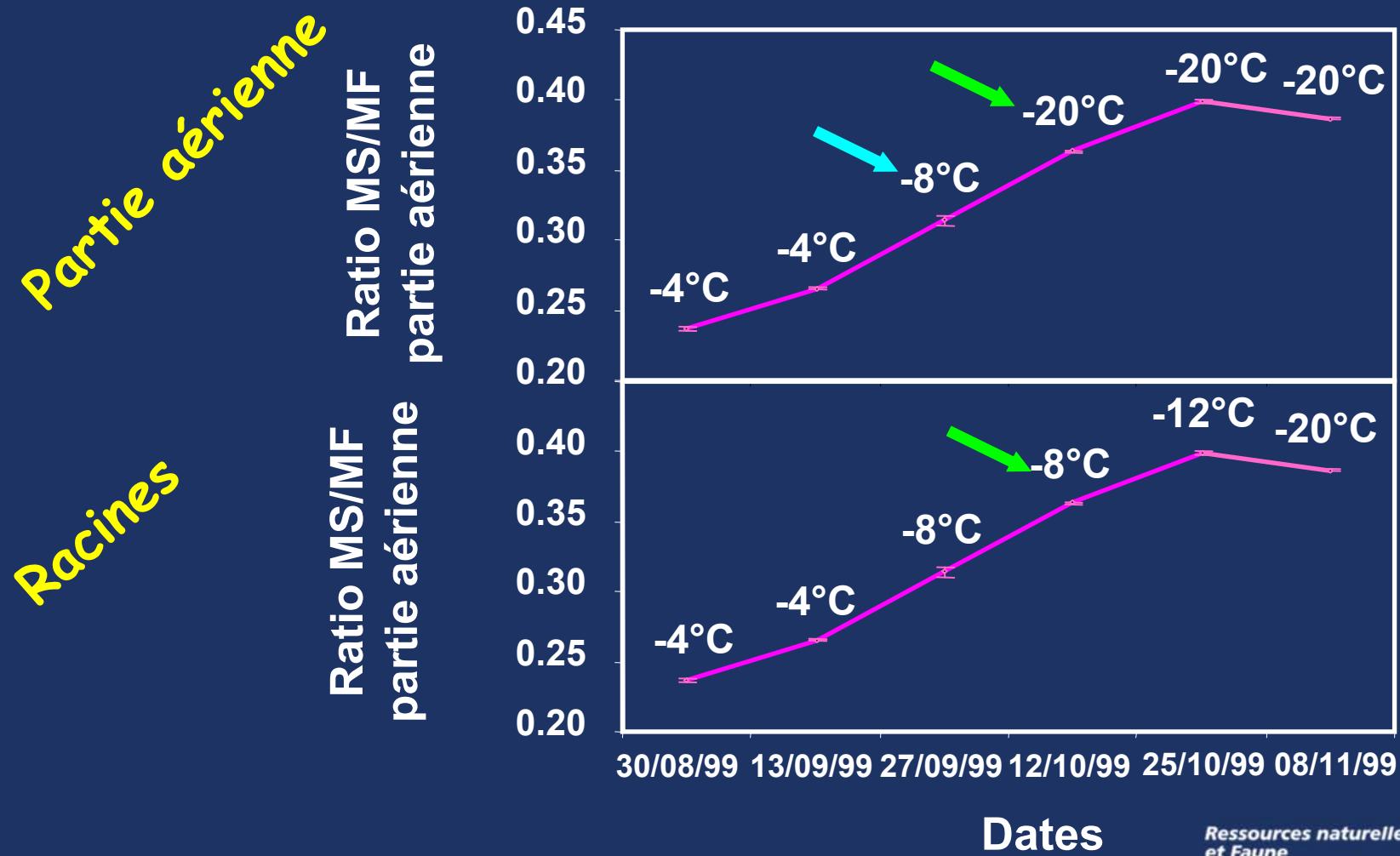
Lina Breton, DCF

Ressources naturelles
et Faune
Québec



Formation des racines d'eau

Seuils de tolérance au gel de l'épinette blanche (1+0) selon la région écologique: Pépinière Trécesson



Tolérance au gel des parties aériennes de l'épinette blanche (1+0): Trécesson

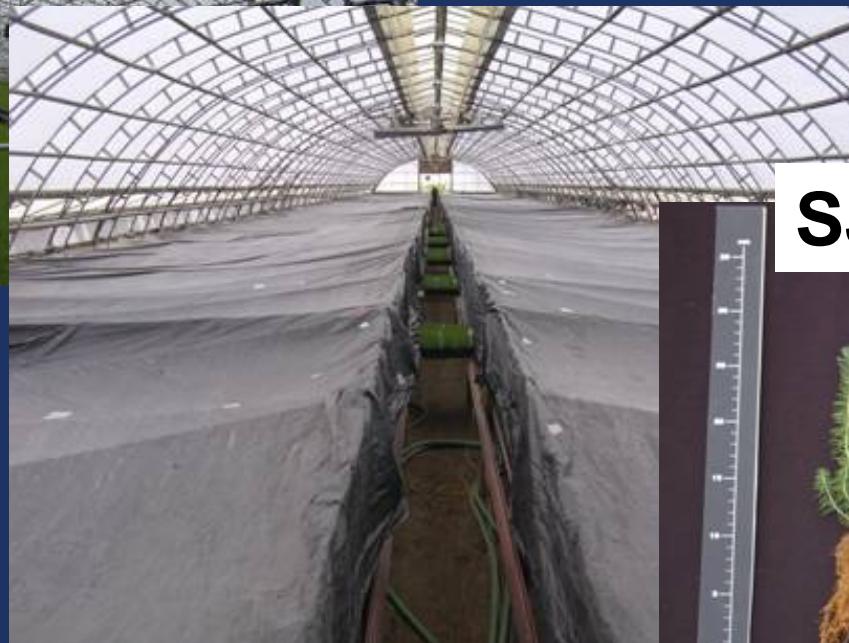
Date	Tolérance (°C)
27 sept. 99	-8.00
28 sept. 99	-8.80
29 sept. 99	-9.60
30 sept. 99	-10.40
1 oct. 99	-11.20
2 oct. 99	-12.00
3 oct. 99	-12.80
4 oct. 99	-13.60

Date	Tolérance (°C)
5 oct. 99	-14.40
6 oct. 99	-15.20
7 oct. 99	-16.00
8 oct. 99	-16.80
9 oct. 99	-17.60
10 oct. 99	-18.40
11 oct. 99	-19.20
12 oct. 99	-20.00

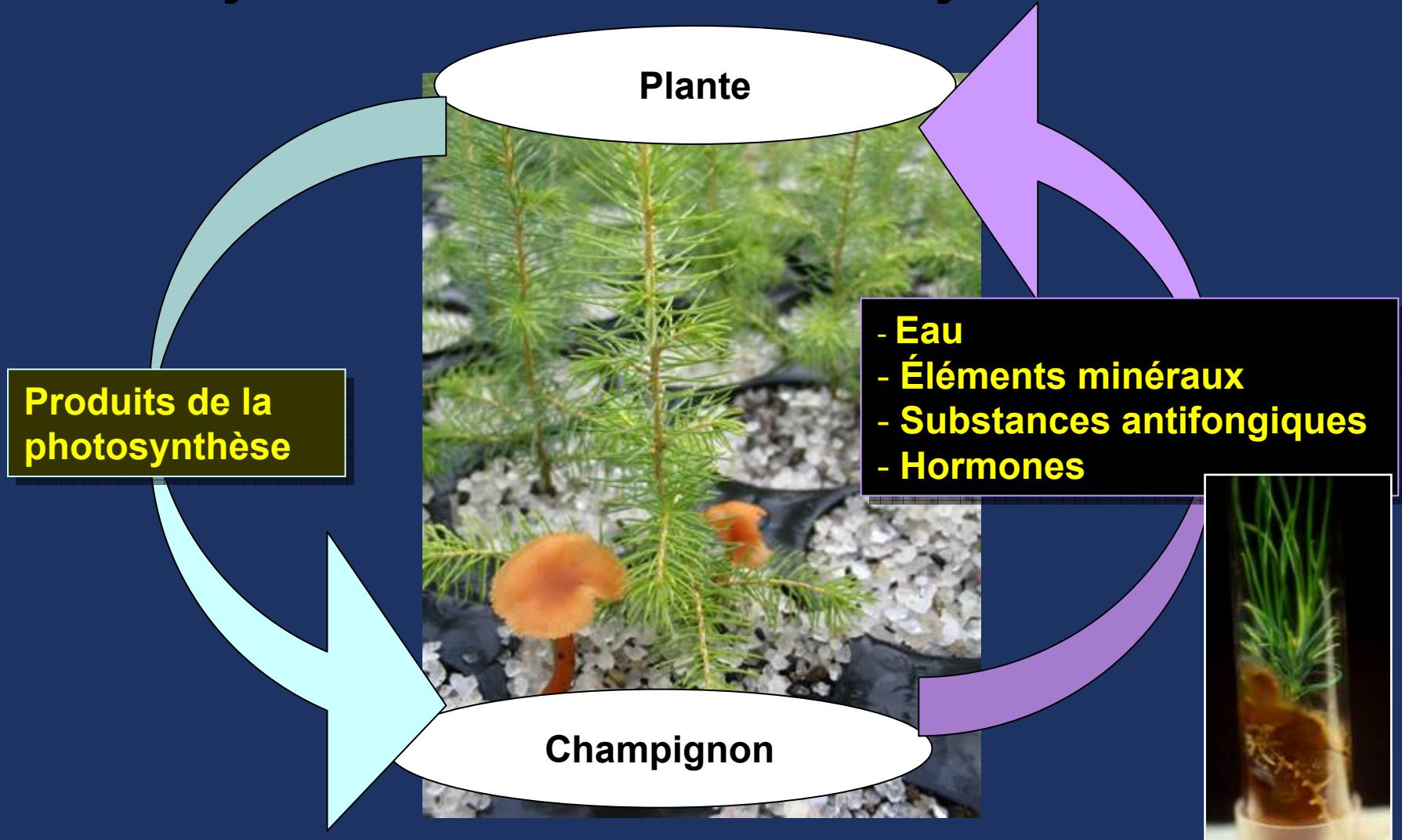
Approches d'amélioration de l'endurcissement et de la croissance des racines

- Traitement de jours courts (**CD du 4e atelier, mars 2006**)
- Pulvérisation à l'aide du Paclobutrazol: arrêt de croissance de la partie aérienne et stimulation des racines (à valider selon nos essences, nos calendriers de production et selon notre climat)
- Inoculation des plants par des champignons ectomycorhziens en automne: Croissance des racines et amélioration de la cohésion

Traitement de jours courts en période de croissance active: Épinette noire (1+0, 67-50)



Symbiose racinaire: Ectomycorhize



Lamhamedi et al. 1994. Can. J. For. Res. 24: 1797-1804

Méthodes d'inoculation en pépinière forestière

- Inoculum solide (une seule souche)

- Inoculum liquide (une seule souche) →



- Inoculum « spores » (nombre indéfini de souches)
- Mélange d'espèces « Cocktail »



Photos: M. Lamhammedi

Québec 

Réussite de l'inoculation

- Période et moment de l'inoculation:
 - Empotage
 - 80 - 90% des plants (hauteur cible)
 - Début endurcissement
- Régie de fertilisation
- Régie d'irrigation
- Espèce forestière
- Compétitivité du champignon **versus** population naturelle
- Adaptation du champignon
- Interaction entre les génotypes: plante - champignon



Photo: M. Lamhammedi

Inoculation des plants à l'aide de spores



Photos: B. Fecteau



Pin gris (2+0)



Épinette de Norvège (2+0), 15-320
17 novembre

Allocation hiérarchique du carbone



- 1 Bourgeons
Nouveau feuillage
- 2 Racines
- 3 Réserves de stockage
dans les racines
- 4 Diamètre
- 5 Substances
de protection



Photosynthèse

- Nutrition minérale (N:1,6-1,8%)
- Lumière (I, P, Q)
- Teneur en eau du substrat
- VPD (Hum. Rel. et température)
- Surface foliaire
- Efficacité d'utilisation (N, P, K,...)
- Durée de la saison de croissance

- Architecture
- Interception (eau et lumière)

- Date d'ensemencement
- Texture du substrat
- Température (< 20°C)
- Teneur en eau du substrat
- pH
- Conductivité
- Teneur en O₂
- Ectomycorhize

Remerciements

- **Mario Renaud et Linda Veilleux**
- **Équipe de reproduction et de production de plants (DRF): Chercheurs et techniciens**
- **Étudiants gradués et professionnels: D. Stowe, O. Bégeron, L. Labbé, B. Fecteau, S. Carles & M. Bakry, M. Masabo.**
- **Hank Margolis, Pierre Y. Bernier et J. Beaulieu**
- **Service des expertises scientifiques (Labo: analyse des échantillons, statistiques et équipe de transfert),**
- **Pépinières publiques et privées (Dispositifs)**
- **Comité organisateur**

Des plants aux plantations : techniques, technologies et performances

Carrefour
de la recherche
forestière

19 et 20
septembre
2007

LA CONNAISSANCE

éloigne les préjugés

— SIMON COOCOO, WEMOTACI

<http://www.mrn.gouv.qc.ca/carrefour/reboisement.asp>

Ressources naturelles
et Faune
Québec 