



HAL
open science

Douglas mycorhisé par *Laccaria bicolor* S238N : bilan des plantations du Cemagref

Benoît Généré, Jean-Michel Amirault, Christian Ginisty

► **To cite this version:**

Benoît Généré, Jean-Michel Amirault, Christian Ginisty. Douglas mycorhisé par *Laccaria bicolor* S238N : bilan des plantations du Cemagref. *Revue forestière française*, 2004, 56 (4), pp.297-306. 10.4267/2042/5102 . hal-03449396

HAL Id: hal-03449396

<https://hal.science/hal-03449396v1>

Submitted on 25 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DOUGLAS MYCORHIZÉ PAR *LACCARIA BICOLOR* S238N : BILAN DES PLANTATIONS DU CEMAGREF

BENOÎT GÉNÉRÉ - JEAN-MICHEL AMIRAULT - CHRISTIAN GINISTY

Lorsque des plants de Douglas sont installés en plantation, leurs racines courtes sont généralement mycorhizées par les souches fongiques naturelles de leur lieu d'élevage en pépinière. Ainsi, on peut y trouver des souches locales de *Thelephora terrestris*, de *Laccaria laccata*, de *Rhizopogon vinicolor* ou de *Hebeloma crustuliniforme*. Parfois, ces mycorhizes peuvent être absentes. Face à une mycorhization naturelle variable dont les conséquences en plantation sont aléatoires et souvent méconnues, la mycorhization contrôlée en pépinière (Le Tacon et Valdenaire, 1980) présente l'avantage de conduire à un état mycorhizien identifié pouvant améliorer les performances lors de l'élevage en pépinière, puis en plantation. Pour obtenir de tels résultats, le champignon associé doit être :

- efficace pour son hôte, le Douglas,
- écologiquement adapté à une large gamme de stations de plantation,
- et compétitif vis-à-vis de la microflore naturelle.

La souche S238N de *Laccaria bicolor*, détenue par l'INRA à Nancy, présente maintenant ces garanties pour le Douglas, à la suite des études qui ont porté sur la fabrication de l'inoculum, l'élevage en pépinière et, plus récemment, les performances en jeune plantation.

Les reboiseurs peuvent trouver du plant de Douglas mycorhizé par la souche S238N de *Laccaria bicolor* dans les catalogues de plusieurs pépiniéristes français, membres du groupement d'intérêt économique (GIE) Forêt-Mycorhizes créé en 1994. Il s'agit de plants produits en conteneurs ou à racines nues, bénéficiant d'un label de l'INRA lorsque leur taux de racines courtes mycorhizées par le symbiote introduit est au moins égal à 30 %. Ces plants doivent être de bonne qualité génétique (provenances contrôlées) et morphologique. Ils ont cependant un surcoût pour l'acheteur ; aussi, il convient d'apprécier le niveau de performance qui peut en être attendu par rapport à des plants témoins, et cela, en fonction des conditions de milieu des sites de plantation.

En France, 16 dispositifs d'évaluation en plantation utilisant des plants de Douglas issus de semis inoculés en pépinière par la souche S238N de *Laccaria bicolor* ont été suivis au moins 5 ans. La moitié de ces sites ont été gérés par l'INRA, l'autre moitié par le Cemagref. Les plantations de l'INRA ont été les premières réalisées et une synthèse des performances observées à 5 ans ou plus a été présentée par Le Tacon *et al.* (1997) ; des résultats intermédiaires du Cemagref y ont également été présentés.

Nous proposons dans cet article de faire le bilan des plantations expérimentales du Cemagref relatives à la mycorhization du Douglas par le champignon *Laccaria bicolor*, souche S238N, notamment en ce qui concerne les apports effectifs de la mycorhize dans des conditions variées de milieu de plantation. Dans ce cadre, des éléments de connaissance, notamment stationnels,

seront donnés par site afin d'aider le forestier dans sa décision de choisir ou non des plants de Douglas mycorhizés par *Laccaria bicolor* S238N.

MATÉRIELS ET MÉTHODE

Le but principal des plantations réalisées par le Cemagref est de tester, en conditions habituelles et sur des stations variées, l'intérêt de la mycorhization contrôlée sur la survie et la croissance en jeune plantation. Par ailleurs, ces plantations peuvent évaluer l'intérêt d'autres composantes de la qualité des plants, morphologiques et physiologiques, en testant respectivement le rôle du type de plant (1+1 ou 2-0) et celui de la conservation au froid en sac. De même, l'importance du lieu d'élevage est évaluée sur 2 sites.

Caractéristiques des huit plantations réalisées sur des sites variés

De 1990 à 1995, 8 plantations expérimentales ont été réalisées par l'unité de recherche "Ressources génétiques et plants forestiers" du Cemagref de Nogent-sur-Vernisson. Chacune des plantations a été installée en dispositif en blocs complets randomisés, avec de 3 à 5 répétitions

par traitement. Chaque plateau comprend 45 plants du même traitement et est entouré de deux rangs de bordure. Des techniques classiques sont employées : préparation fine du terrain avec élimination de la végétation concurrente et labour ou sous-solage ; plantation à la pioche au printemps, avec une densité de 950 à 1 100 plants par hectare ; dégagements successifs sur la ligne puis en interligne, en fonction des besoins et de façon à maîtriser la végétation concurrente.



FIGURE 1
LOCALISATION DES SITES
D'ÉLEVAGE ET DE PLANTATION

La figure 1 (ci-dessus) donne la localisation des sites expérimentaux : on constate que plus de la moitié d'entre eux sont situés dans le Massif central qui est une zone importante de reboisement.

Le tableau I (p. 299) donne les principales caractéristiques des sites et le tableau II (p. 300), la caractérisation physico-chimique des trente premiers centimètres de sol.

Sur les 8 sites, deux correspondent à des conditions limites de station pour le Douglas, au niveau climatique : Varenguebec, dans le Cotentin, par son climat très océanique, ses tempêtes,

TABLEAU I Principales caractéristiques des sites de plantation

Site (département)	Date de plantation	Altitude (mètres)	Pluviosité (mm/an)	Pente et orientation	Substrat géologique	Type de sol superficiel	Profondeur de sondage à la tarière	Précédent culturel
Salon-la-Tour.. (Corrèze)	20/2/1990	400	1 150	15 % Est	Gneiss	Brun acide lessivé	> 120 cm	Taillis mixte
Pellanges (Creuse)	28/3/1990	730	1 400	10-15 % Sud à Sud-Est	Arène granitique	Ocre podzolique	60 cm	Prairie
Châteldon (Puy-de-Dôme)	27/3/1991	500	800	10-15 % Ouest	Alluvions sableuses	Brun acide	80 cm	Taillis feuillu
Varenguebec... (Manche)	4/4/1991	30	900	0 %	Grès	Brun acide	> 120 cm	Taillis-sous-futaie (Chêne)
Siran (Cantal)	24/3/1992	670	1 500	4 % Sud-Est	Micaschiste	Brun acide lessivé	80 cm	Futaie mixte (Pin et Chêne)
Verdun-en-Lauragais (Aude)	16/3/1993	460	950	0-5 % Sud à Sud-Est	Schistes	Brun acide	70 cm	Prairie
Auzoux..... (Creuse)	24/3/1993	700	1 300	10 % Sud-Est	Arène granitique	Brun ocre humifère	60 cm	Accru mixte
Luthenay-Uxeloup (Nièvre)	29/3/1995	180	770	0 %	Alluvions de la Loire	Limon sableux	70 cm	Friche agricole

et surtout Verdun-en-Lauragais, sur les contreforts Sud de la Montagne Noire, par sa sécheresse estivale et ses journées de canicule. Un troisième site, Luthenay-Uxeloup, correspond à des conditions de station satisfaisantes pour le Douglas, mais peu communes (en plaine, sur alluvions de Loire, avec pluviosité satisfaisante). Les cinq autres plantations sont réalisées sur des stations habituelles à Douglas, aussi bien pour l'altitude (400 à 800 m), le climat (pluviosité annuelle d'au moins 800 mm, bien répartie sur l'année, sans sécheresse estivale marquée) et les conditions de sol (sols bruns ou ocres, développés sur des roches métamorphiques, granitiques ou sur des alluvions, sans hydromorphie apparente). La profondeur du sol prospectable par les racines y est toujours suffisante pour permettre un enracinement durable des arbres, y compris dans la roche mère fracturée ou dans les alluvions grossières sous-jacentes.

Les terrains plantés étaient soit d'antécédent forestier, soit d'antécédent agricole avec des prairies à Pellanges et à Verdun-en-Lauragais et des friches après culture de pépinière à Luthenay-Uxeloup.

L'analyse physico-chimique des 30 premiers centimètres de sol révèle d'autres spécificités. Sur trois sites (Salon-la-Tour, Siran et Auzoux), le taux de saturation en cations est inférieur à 10 %, ce qui, selon Gilbert (1995), induit une croissance moindre du Douglas ; parallèlement, le magnésium échangeable y est en faible quantité. Dans ces conditions, la mycorhization contrôlée peut-elle corriger cet état ? À Pellanges, Châteldon, Verdun-en-Lauragais et Auzoux, la structure sableuse du sol peut induire de la mortalité, en cas de sécheresse estivale durant les premières années. Une carence en phosphore est observée sur 4 sites : Varenguebec, Siran, Châteldon et

TABLEAU II Caractérisation physico-chimique des 30 premiers cm de sol des sites de plantation

Site de plantation	Granulométrie en % de terre fine minérale			Matières organiques en % de terre fine			pH eau	Cations échangeables en méq/100 g					Phosphore (Dyer) en ‰
	Sable	Limon	Argile	Total	N*	C/N		CEC ** (Metson)	Ca	K	Mg	Taux de saturation (%)	
Salon-la-Tour...	41	36	23	5,5	0,26	12,2	4,7	10,2	0,4	0,17	0,07	6,5	0,02
Pellanges	62	25	13	7,0	0,34	12,0	5,1	16,1	3,5	0,16	0,21	24	0,24
Châteldon	67	21	12	4,7	0,18	15,1	4,4	7,3	2,1	0,22	0,31	36	0,03
Varenguebec...	17	54	29	4,2	0,21	11,8	4,9	9,6	1,7	0,34	0,99	33	0,01
Siran	36	41	23	6,5	0,21	18,1	4,5	13,1	0,1	0,12	0,05	2,2	0,01
Verdun-en-L...	62	21	17	3,4	0,19	10,1	5,2	8,9	4,9	0,46	0,61	68	0,15
Auzoux.....	63	20	17	7,6	0,28	15,6	5,0	15,6	0,1	0,12	0,10	2,7	0,06
Luthenay-Ux...	35	43	22	1,6	0,11	8,4	6,5	10,3	8,9	0,27	2,02	100	0,26

* N = azote (Kjeldhal) ; ** CEC = capacité d'échange cationique.

Salon-la-Tour. En revanche, le site de Luthenay-Uxeloup apparaît très fertile (limono-argileux, saturé en cations, riche en phosphore) et à pH neutre, ce qui est favorable à la croissance.

Matériel végétal : des plants de 2 ans, inoculés ou non en pépinière

Les plants sont de provenance Washington (États-Unis), zone 422, ou 202 pour Salon-la-Tour et Pellanges. Ils ont été élevés en 2 ans dans les pépinières de Peyrat-le-Château (Haute-Vienne) ou des Barres, à Nogent-sur-Vernisson (Loiret). Après semis sur planche désinfectée au bromure de méthyle, les itinéraires en pépinière des plants inoculés ont évolué de 1990 à 1995, jusqu'à prendre en compte intégralement, sur Luthenay-Uxeloup, l'itinéraire technique préconisé par Généré *et al.* (1997). Le repiquage des plants étant bénéfique, pour les plants inoculés comme pour les plants témoins, en termes de performance après plantation (Généré, 1995), c'est le type de plants 1+1 (un an en planche de semis + un an en planche de repiquage) qui est privilégié sur tous les sites, sauf à Auzoux et à Verdun-en-Lauragais où le type 2-0 (deux ans en planche de semis sans repiquage) a été utilisé. Notons que les plants de type 1+1 répondent systématiquement aux normes dimensionnelles françaises (hauteurs 20-30 cm avec diamètre > 4 mm et 30-40 cm avec diamètre > 5 mm), ce qui n'est pas le cas des plants 2-0 (à faible diamètre au collet). Dans tous les cas, les plants témoins sont issus des mêmes lots de graines que les plants inoculés, sont élevés dans la même pépinière, sont normalement fertilisés et ont le même itinéraire d'élevage. Dans cet article et pour chaque plantation, les deux modalités comparées sont le traitement inoculé au semis en pépinière par *Laccaria bicolor* S238N, selon la meilleure technique de production du moment, et le traitement témoin défini ci-dessus.

Méthode expérimentale : mesures et analyses statistiques

Sur chaque site de plantation, la hauteur initiale des plants, leur survie et leur croissance annuelle durant les 5 premières années, sont mesurées. À Salon-la-Tour et Pellanges, des mesures de diamètre à 5 ans (à 1,30 m) et de hauteur à 8 ans s'y ajoutent.

Pour faciliter la comparaison des résultats entre sites, seules sont présentées dans cet article la croissance cumulée des plants sur 5 ou 8 ans, et la survie à 5 ans. Les analyses sont réalisées par des méthodes statistiques appropriées, en utilisant le logiciel Statgraphics. Pour la crois-

sance, le modèle interactif de l'analyse de variance à deux facteurs (modalités et blocs) a été utilisé ou, si ses conditions de validité n'étaient pas vérifiées, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Pour la survie, le test du Khiz a permis de comparer les modalités et de conclure quand le classement était indépendant des blocs. Dans tous les cas, seules les différences significatives au seuil de 5 % sont mentionnées (Test de Tukey, pour l'analyse de variance). Les plants morts, et ceux présentant des dégâts de gibier ou de dégagement, ont été exclus des mesures de croissance. Par ailleurs, l'état mycorhizien des plants inoculés a été mesuré avant plantation (taux de racines courtes mycorhizées par *Laccaria*).

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le tableau III (ci-dessous) indique, 5 ans après plantation, les performances de croissance et de survie des plants témoins et, le cas échéant, la différence de performance des plants inoculés en pépinière par *Laccaria bicolor* S238N. Par ailleurs, sont indiqués le taux de mycorhization des plants inoculés à leur arrachage en pépinière, ainsi que le lieu d'élevage, commun aux plants témoins et inoculés.

Performance des plants témoins

La croissance cumulée des 5 premières années de plantation a été maximale sur les 3 sites de Châteldon, Luthenay-Uxeloup et Pellanges (plus de 2,5 m) et minimale sur les 4 sites de Verdun-en-Lauragais, Varengebec, Siran et Salon-la-Tour (moins de 1,8 m) ; seul le site d'Auzoux est entre ces deux groupes bien distincts. Quant à la survie 5 ans après plantation, elle est satisfaisante (> 80 %), sauf sur deux sites : Châteldon (73 %) et Verdun-en-Lauragais (62 %).

TABLEAU III Performance sur 5 ans des plants témoins et inoculés, par site

Site de plantation	Plants témoins *		Lieu d'élevage des plants : N = Nogent P = Peyrat	Plants inoculés *		
	Performance			Différence de performance par rapport aux plants témoins**		
	Croissance (C) en cm	Survie (S) en %		En pépinière	En plantation	T.M.*** initial
Salon-la-Tour..	176	97	N	N.S.	C : + 38 cm (+ 22 %)	10
Pellanges	254	100	N	N.S.	N.S.	10
Châteldon	264	73	P	+ 5 cm (25 %)	S : + 17 %	54
Varengebec...	166	83	P	+ 5 cm (25 %)	N.S.	54
Siran	166	89	P	N.S.	C : + 43 cm (+ 27 %) S : + 7 %	33
Verdun-en-Lauragais	152	62	P	N.S.	C : + 25 cm (+ 13 %)	30
Auzoux.....	215	84	P	N.S.	N.S.	50
Luthenay-Uxeloup	257	92	P	+ 11 cm (34 %)	C : + 45 cm (+ 17 %)	46

* Type 1 + 1, sauf pour Auzoux et Verdun-en-Lauragais (plants de type 2-0 fertilisés) ;

** N.S. = différence non significative, au seuil d'erreur de 5 % ;

*** T.M. = taux de mycorhization par *Laccaria*.

Performance des plants inoculés

Cinq ans après plantation, la croissance des plants inoculés est significativement supérieure à celle des plants témoins sur la moitié des sites. À Siran et à Luthenay-Uxeloup, le gain est de 40 à 50 cm, ce qui permet d'économiser un dégageur. À Salon-la-Tour et à Verdun-en-Lauragais, le gain est de 20 à 40 cm, sur 5 ans ; on constate, à Salon-la-Tour, qu'il augmente ensuite pour s'établir à 60 cm, 8 ans après plantation (figure 2, ci-contre). Cela permet aussi d'économiser un dégageur. Néanmoins, sur ce site à sol très pauvre chimiquement (fortement désaturé), tous les placeaux ont dû être fertilisés, suite à un dépérissement généralisé (à 5-6 ans).

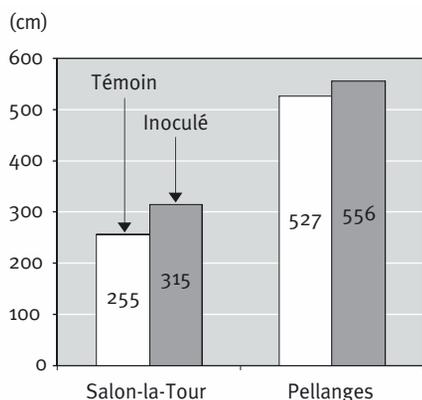


FIGURE 2
CROISSANCE DES PLANTS
TÉMOINS ET INOCULÉS (EN CM), SUR 8 ANS,
POUR LES 2 SITES DE PLANTATION LES PLUS ANCIENS
 Seule, la différence de 60 cm observée à Salon-la-Tour est significative.

Cette pratique de fertilisation de correction des jeunes plantations de Douglas installées sur gneiss ou micaschistes est conforme aux recommandations (de Champs, 1996) et elle a revigoré les jeunes arbres. Notons qu'un dépérissement atténué a aussi été constaté sur la plantation de Siran (à 4 ans).

Lorsque la survie des plants témoins de Douglas est satisfaisante (supérieure à 80 % pour 6 sites), celle des plants inoculés l'est également, avec même une amélioration significative dans un cas (Siran, + 7 %). À Verdun-en-Lauragais, la survie est mauvaise (62 %) et indépendante de l'inoculation en pépinière. À Châteldon, la survie des plants non inoculés est médiocre (73 %) alors que celle des plants inoculés est satisfaisante (90 %).

Pépinière d'origine et taux de mycorhization

L'apport de la mycorhization contrôlée sur la performance en plantation n'est pas lié à son apport sur la performance en pépinière. En effet, on sait que la souche S238N de *Laccaria bicolor* améliore généralement la performance des plants sur la pépinière de Peyrat-le-Château, mais pas sur celle des Barres (Génére et Amirault, 1991), ce que l'on retrouve également sur le tableau III (cf. colonnes centrales, p. 301). En plantation, la performance peut être améliorée avec des plants élevés aux Barres (à Salon-la-Tour), comme elle peut ne pas l'être avec des plants élevés à Peyrat-le-Château et indépendamment du fait que la croissance ait été améliorée en pépinière (cas de Varenguebec) ou non (cas d'Auzoux).

Le taux de mycorhization des plants en sortie de pépinière par le genre *Laccaria* (la souche S238N plus les éventuelles souches locales) avait été mesuré sur au moins 25 plants inoculés de chaque essai (à raison de 5 à 10 par bloc), selon la technique mise au point par Garbaye (1990). La dernière colonne du tableau III montre que les taux de mycorhization ont été systématiquement d'au moins 30 % pour les plants élevés à Peyrat-le-Château ; ils peuvent se situer autour de 50 % en utilisant des techniques de production adéquates (en type de plant 1 + 1, avec repiquage sur planche désinfectée ; en type de plant 2-0, avec cernage racinaire en fin d'élevage). Aux Barres, les plants inoculés du premier essai de 1990 ne présentaient qu'un taux

de *Laccaria* de 10 %, en raison d'une absence de désinfection des planches de repiquage ; si l'inoculation en pépinière n'a pas d'effet sur la croissance en plantation à Pellanges, elle la stimule fortement à Salon-la-Tour, et cela semble continuer 8 ans après plantation, malgré le faible taux de mycorhization initial des plants. Inversement, des plants inoculés élevés à Peyrat-le-Château et mycorhizés par *Laccaria* à environ 50 % n'ont pas d'effet sur la performance en plantation sur les deux sites de Varenguebec et d'Auzoux.

DISCUSSION

Nous discuterons en premier lieu des performances obtenues avec les plants témoins au regard des conditions de milieu, notamment d'alimentation minérale, dans les différents sites, puis nous nous intéresserons aux résultats des plants inoculés.

Performance des plants témoins

La croissance en hauteur des plants témoins est maximale sur les 3 sites de Châteldon, Luthenay-Uxeloup et Pellanges (plus de 2,5 m). Cela peut s'expliquer par une absence de facteur limitant la croissance. Tout d'abord, le taux de saturation de la CEC (capacité d'échange cationique) est satisfaisant, compris entre 24 et 100 % (Gilbert, 1995). Le phosphore du sol est abondant à Pellanges et Luthenay-Uxeloup (> 0,2 pour mille) et l'est moins à Châteldon (0,03 pour mille), sans pour autant constituer un facteur limitant. Les autres paramètres de sol, pH eau (4,4 à 6,5), teneur en matière organique (1,6 à 7 %) et en azote Kjeldhal (0,11 à 0,34 %), CEC totale (7,3 à 16,1), profondeur du sol prospectable (> 60-70 cm), sont satisfaisants pour le Douglas. Néanmoins, à Châteldon, une forte mortalité est constatée, sur plus d'un quart des plants, et elle est intervenue principalement en 2^e année (1992). Sa cause est certainement climatique, en lien avec la sécheresse estivale des étés 1991 et 1992, accentuée par un climat plus continental que sur les autres sites, une forte pente drainant l'eau, et un sol de texture sablo-limoneuse.

La croissance en hauteur est minimale sur les 4 sites de Verdun-en-Lauragais, Varenguebec, Siran et Salon-la-Tour (moins de 1,8 m). À Verdun-en-Lauragais, dans l'Aude, la sécheresse estivale quasi systématique, accrue par un sol moyennement profond (70 cm), une exposition défavorable au Sud et une texture sablo-argileuse, peut expliquer la faible croissance observée. Cette même sécheresse, associée aux épisodes de canicule habituels dans la région toulousaine, est à l'origine de roussissements brutaux des aiguilles causant, soit une descente de cime, soit la mort du jeune arbre. Ce phénomène, constaté dans de nombreuses régions lors de la canicule d'août 2003, explique la mort de près de 40 % des plants 5 ans après plantation, à Verdun-en-Lauragais.

À Varenguebec, à Siran et à Salon-la-Tour, la teneur du sol en phosphore (0,001 et 0,002 pour mille) est plus faible que sur tous les autres sites, et peut expliquer des difficultés de croissance. Il en est de même du taux de saturation de la CEC, bien inférieur à 10 % (valeur critique selon Gilbert, 1995) à Siran et à Salon-la-Tour, mais pas à Varenguebec (33 %). Sur ce dernier site, un facteur aggravant est certainement l'hydromorphie du sol en hiver, accentuée par une texture limono-argileuse assez défavorable au Douglas, mais néanmoins atténuée par des fossés de drainage (50 cm de profondeur).

Le site d'Auzoux présente une croissance intermédiaire (2,15 m) entre les deux groupes précédents. Cela peut s'expliquer par un taux de saturation de la CEC très faible (2,7 %), mais sans facteur aggravant, le niveau de phosphore étant correct (0,06 ppm) comme les autres paramètres de sol et de climat.

Performance des plants inoculés

Sur les trois plantations à forte croissance des plants témoins, la mycorhization contrôlée a permis d'obtenir un gain significatif à Châteldon et à Luthenay-Uxeloup, mais pas à Pellanges.

- À Châteldon, la survie est améliorée de 17 %, ce qui tend à montrer que la souche S238N de *Laccaria bicolor* a pu conférer aux plants inoculés une meilleure tolérance aux déficits hydriques marqués de 1991 et 1992 ; le mécanisme en question n'est cependant pas connu à ce jour.
- À Luthenay-Uxeloup, la croissance est accrue de 45 cm sur 5 ans : cette excellente performance est due non seulement à l'inoculation (en l'absence de facteur limitant identifié dans le sol), mais aussi à l'amélioration des techniques de production et de conservation des plants inoculés (Génére, 1997).
- À Pellanges, l'inoculation n'a pas apporté de gain, probablement parce que l'abondance des graminées inhibe l'expression du champignon inoculé.

Sur les quatre plantations à faible croissance des plants témoins, la mycorhization contrôlée en pépinière a permis d'obtenir un gain de croissance sur tous les sites, sauf à Varengebec. Sur ce dernier, la nature du sol (limon argileux) induit vraisemblablement des conditions d'asphyxie en période fraîche et humide prolongée, susceptibles de faire régresser les mycorhizes. À Verdun-en-Lauragais, la croissance est améliorée de 25 cm, en l'absence de facteur limitant identifié dans le sol. À Siran et à Salon-la-Tour, le gain est plus important et peut s'expliquer par une meilleure mobilisation du phosphore et des cations échangeables du sol, qui sont déficitaires sur ces deux sites. On notera aussi que le symbiote inoculé n'a pu améliorer la survie des plants de Douglas exposés à de fortes sécheresses et à des épisodes de canicule, à Verdun-en-Lauragais.

Enfin, sur la plantation à croissance intermédiaire d'Auzoux, nous avons vu que le taux de saturation en cations échangeables était, au niveau de l'alimentation minérale, le seul facteur limitant identifié. Dans ces conditions, il est surprenant de constater que *Laccaria bicolor* S238N n'améliore pas la croissance des plants. Pour l'expliquer, on peut évoquer la présence d'une flore mycorhizienne en plantation plus performante, éliminant la souche S238N ou bien la contamination, observée en pépinière, des plants témoins (sur 20 % des racines courtes) comme des plants inoculés (sur 36 %) par une souche de *Rhizopogon* présente à Peyrat-le-Château. Néanmoins, Di Battista *et al.* (2002) ont montré par typage moléculaire que, sur une ancienne terre cultivée en Lorraine, cette souche contaminante disparaissait après plantation de Douglas. Mais ce résultat n'est probablement pas transposable à la plantation d'Auzoux qui présente les conditions pédo-climatiques et géographiques les plus proches de celles de la pépinière de Peyrat-le-Château : au niveau du sol, on remarque notamment une texture, un pH et une teneur en matière organique identiques. Cette proximité pourrait conduire à une persistance plus longue du contaminant qui a fait preuve d'un réel pouvoir colonisateur en pépinière.

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus sur les 8 plantations du Cemagref suivies pendant 5 ans, voire 8 ans pour les deux premières, nous permettent de préciser l'intérêt de la mycorhization contrôlée du Douglas par *Laccaria bicolor* S238N sur la performance en jeune plantation. Cet intérêt vaut pour les stations à Douglas reconnues, mais ne permet pas d'étendre les possibilités de plantation de cette espèce à des sols hydromorphes, même temporairement, ou à des climats plus chauds et secs que sa tolérance habituelle : le manque de résultat constaté sur la croissance à Varengebec (sol limono-argileux avec hydromorphie) et sur la survie à Verdun-en-Lauragais nous le montre clairement.

Les résultats présentés permettent de compléter et d'approfondir le bilan des plantations européennes de Douglas mycorhizé par *Laccaria bicolor* S238N établi par Le Tacon *et al.* (1997). Ils montrent que le niveau de performance des plants témoins peut être comparé entre sites et que les différences observées peuvent s'expliquer. La mycorhization contrôlée a un effet soit neutre (3 cas sur 8), soit bénéfique (5 cas sur 8) sur les performances. Ce bilan positif intervient sur des sites à sol pauvre, ce qui était attendu, mais aussi sur des sites sans facteur limitant au niveau trophique. Ce bilan global favorable est compatible avec celui obtenu sur les types de plants, avec, pour des plants à racines nues, l'effet favorable ou neutre du 1+1 par rapport au 2-0 (Génére, 1995). De même, la conservation au froid et en sac de plants de Douglas arrachés en hiver, pour des plantations de printemps, a un effet favorable ou neutre, selon l'essai, par rapport à l'utilisation de plants frais au printemps. La combinaison de toutes ces techniques de production et de conservation a été testée en pépinière (Génére *et al.*, 1997), puis sur le site de Luthenay-Uxeloup dont les résultats globaux sont intégrés dans cette synthèse. Globalement, nos résultats montrent que, pour l'itinéraire cultural de production des plants inoculés suivi par le GIE Forêt-Mycorhizes, l'économie d'un dégagement est un objectif réaliste, qui a été atteint sur au moins 3 de nos plantations : Salon-la-Tour, Siran et Luthenay-Uxeloup. Cette économie de dégagement, de l'ordre de 200 à 350 € par ha, est à mettre en regard du surcoût que représente l'achat de plants mycorhizés par *Laccaria bicolor* S238N, de l'ordre de 0,20 à 0,30 € par plant et donc d'environ 200 à 300 € par ha.

Le site de Salon-la-Tour montre que, 8 ans après la plantation, les plants inoculés en pépinière 10 ans auparavant grandissent toujours plus vite que les plants témoins : la souche S238N de *Laccaria bicolor* est toujours présente et active. Ce résultat est conforme aux observations de Selosse *et al.* (1998) qui constatent, par typage moléculaire, que cette souche est toujours majoritaire et pure, 10 ans après plantation, sur les plants inoculés de la plantation INRA de Douglas à Saint-Brisson (Nièvre), alors que cette même souche n'a pas colonisé les plants témoins.

Il est enfin à signaler que les conseils de fertilisation donnés par de Champs (1996), sur des sols très carencés en phosphore (0,002 ppm ou moins, par méthode Dyer), doivent s'appliquer aux plants inoculés comme aux plants témoins. Les sols déve- loppés sur gneiss, et dans une moindre mesure sur micaschiste, semblent les plus concernés.

Benoît GÉNÉRÉ
DIRECTION DÉPARTEMENTALE DE L'AGRICULTURE
ET DE LA FORÊT DU LOIRET
131, rue du Faubourg Bannier
Cité Colligny
F-45042 ORLÉANS CEDEX 1
(benoit.genere@agriculture.gouv.fr)

Jean-Michel AMIRAULT
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Maison forestière du Buisson
F-45200 PAUCOURT

Christian GINISTY
Unité de Recherche "Écosystèmes forestiers"
CEMAGREF
Domaine des Barres
F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON
(christian.ginisty@cemagref.fr)

Remerciements

Nous remercions les propriétaires des sites de plantation, qui ont accepté par convention les expérimentations réalisées et qui ont participé à leur installation, à leur suivi et à leur entretien. Notre reconnaissance va également au personnel des pépinières de Peyrat-le-Château et des Barres qui a élevé les plants, contribué activement à leur plantation puis aux mesures et aux entretiens réalisés. Enfin, nos remerciements vont à l'équipe de Microbiologie forestière de l'INRA de Nancy, ainsi qu'au GIE Forêt-Mycorhizes, pour leur soutien sans faille à nos expérimentations et à la mise au point de techniques.

BIBLIOGRAPHIE

- CHAMPS (J. de). — La Fertilisation forestière. — *Forêts de France*, n° 396, 1996, pp. 22-28.
- DI BATTISTA (C.), BOUCHARD (D.), MARTIN (F.), GÉNÉRÉ (B.), AMIRAULT (J.-M.), LE TACON (F.). — Survival after outplanting of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor* S238N inoculated on Douglas fir cuttings. — *Annals of Forest Science*, vol. 59, 2002, pp. 81-92.
- GARBAYE (J.). — Pourquoi et comment observer l'état mycorhizien des plants forestiers. — *Revue forestière française*, vol. XLII, n° 1, 1990, pp. 35-41.
- GÉNÉRÉ (B.). — Évaluation en jeune plantation de 2 types de plants de Douglas mycorhizés artificiellement par *Laccaria laccata* S238N. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 52, 1995, pp. 375-384.
- GÉNÉRÉ (B.). — Les facteurs influençant la qualité des plants plantés, et la prise en compte des risques climatiques après plantation. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° 4, 1997, pp. 313-323.
- GÉNÉRÉ (B.), AMIRAULT (J.-M.). — L'Élevage du Douglas mycorhizé au semis : influence de la pépinière et du type de plant. — *Études Forêt* n° 6 (annales 1990 du département Forêts du Cemagref), 1991, pp. 186-197.
- GÉNÉRÉ (B.), BOUCHARD (D.), AMIRAULT (J.-M.). — Itinéraire technique en pépinière pour le Douglas de type 1+1 mycorhizé par *Laccaria bicolor* S238N. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° spécial "Champignons et mycorhizes en forêt", 1997, pp. 155-162.
- GILBERT (J.-M.). — Stations forestières et production du Douglas dans le pays d'Othe. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 4, 1995, pp. 343-356.
- LE TACON (F.), VALDENNAIRE (J.-M.). — La Mycorhization contrôlée en pépinière, premiers résultats obtenus à la pépinière du Fonds forestier national de Peyrat-le-Château sur Épicéa et Douglas. — *Revue forestière française*, vol. XXXII, n° 3, 1980, pp. 281-292.
- LE TACON (F.), MOUSAIN (D.), GARBAYE (J.), BOUCHARD (D.), CHURIN (J.-L.), ARGILLIER (C.), AMIRAULT (J.-M.), GÉNÉRÉ (B.). — Mycorhizes, pépinières et plantations forestières en France. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° spécial "Champignons et mycorhizes en forêt", 1997, pp. 131-154.
- SELOSSE (M.-A.), JACQUOT (D.), BOUCHARD (D.), MARTIN (F.), LE TACON (F.). — Temporal persistence and spatial distribution of an American inoculant strain of the ectomycorrhizal basidiomycete *Laccaria bicolor* in a French forest plantation. — *Molecular Ecology*, n° 7, 1998, pp. 561-573.

DOUGLAS MYCORHIZÉ PAR *LACCARIA BICOLOR* S238N : BILAN DES PLANTATIONS DU CEMAGREF (Résumé)

Afin de tester l'intérêt forestier de la mycorhization contrôlée du Douglas par la souche S238N de *Laccaria bicolor*, huit plantations expérimentales ont été réalisées par le Cemagref de 1990 à 1995. Ces plantations comparent des plants inoculés produits selon un itinéraire technique mis au point progressivement et des plants témoins de même origine génétique, type de plant et pépinière d'élevage. Les analyses présentées portent sur la croissance et la survie, 5 ans après plantation, ainsi que sur la croissance cumulée sur 8 ans pour les 2 sites les plus anciens. Les résultats montrent des différences de croissance entre sites pour le traitement témoin, qui sont expliquées par les conditions de station. Les plants inoculés en pépinière ont une croissance significativement supérieure au témoin dans 4 des 8 sites, et un gain significatif sur la survie est obtenu sur 2 sites. L'économie d'un dégageement en plantation est donc possible. Par contre, d'après nos résultats, le symbiote associé ne permet pas d'étendre l'aire de culture du Douglas à des stations à sécheresse estivale marquée et à épisode de canicule, ni semble-t-il, à des stations à caractère hydromorphe.

DOUGLAS FIR MYCORRHIZED WITH *LACCARIA BICOLOR* S238N – EVALUATION OF CEMAGREF PLANTATIONS (Abstract)

Cemagref established eight Douglas-fir experimental plantations from 1990 to 1995 to assess the value of inoculation using *Laccaria bicolor* S238N at the nursery stage. In these field trials, inoculated seedlings were compared to controls of identical seed origin, plant type and nursery site. The nursery techniques to produce inoculated seedlings were also regularly improved and a protocol was established in 1995. Analyses were performed on incremental height growth and survival 5 years after planting, and 8 years after planting for the two oldest field trials. Results show site differences between controls in incremental growth that are attributable to local soil and climate data. Inoculated seedlings grew significantly more than controls on half of the sites, and their survival was twice as high. This makes it possible to dispense with one clearing operation. On the other hand, our results indicate that use of this symbiont does not allow the Douglas-fir growing area to be extended to forest sites with extremely hot temperatures and severe droughts or with temporarily waterlogged soils.
