



LA MAÎTRISE DE LA CULTURE DE LA TRUFFE

G. CHEVALIER - H. FROCHOT

La culture de la truffe offre l'exemple le plus célèbre d'application de la mycorhization contrôlée, d'abord à cause de l'aura qui environne ce champignon prestigieux, ensuite parce que c'est la première application en vraie grandeur de cette méthode à la culture d'un champignon comestible mycorhizien.

La truffe est en effet un champignon mycorhizien, qui ne peut donc accomplir son cycle complet qu'avec une plante-hôte, comme un Chêne ou un Noisetier.

En donnant naissance au plant mycorhizé par la truffe, appelé communément "plant truffier", l'INRA reprenait, d'une part les découvertes fondamentales des chercheurs italiens qui avaient les premiers réalisé la synthèse mycorhizienne d'une espèce de truffe (*Tuber maculatum* Vitt.) avec un arbre (*Pinus strobus* L.) (Fassi et Fontana, 1967), et d'autre part les pratiques traditionnelles des planteurs du Sud de la France qui réalisaient depuis longtemps leurs "plants truffiers" à partir de méthodes empiriques, ceci avec plus ou moins de succès (Chevalier et Grente, 1979). La relance de la trufficulture en déclin demandait, en effet, de disposer à grande échelle de plants truffiers fiables, c'est-à-dire correctement mycorhizés par l'espèce de truffe souhaitée, et non contaminés par d'autres champignons.

Cet article propose de faire le point sur l'application, en France, de la mycorhization contrôlée à différentes espèces de truffes commercialisables. Après avoir présenté brièvement ces espèces, nous nous intéresserons essentiellement à deux des espèces les plus répandues en France, la truffe noire dite de Périgord (*Tuber melanosporum* Vitt.) et la truffe dite de Bourgogne (*Tuber uncinatum* Chatin).

LES TRUFFES COMMERCIALISABLES EN FRANCE

On connaît une quinzaine d'espèces de truffes sur le sol français, dont six seulement comestibles et de plus ou moins grande valeur (Chevalier *et al.*, 1990). Les truffes sont des champignons ascomycètes, c'est-à-dire dont les spores se produisent dans des asques (comme les morilles ou les pézizes), qui appartiennent au genre *Tuber*. Parmi ces espèces, deux seulement à la fois sont commercialisées couramment et utilisées par les pépiniéristes français pour la production de plants mycorhizés. L'accord interprofessionnel "Truffes fraîches" du 8 octobre 1996 autorise désormais la commercialisation de 9 espèces.

La truffe noire (*Tuber melanosporum* Vitt.) est la plus réputée en France. Ses exigences en chaleur lui font préférer les régions méridionales, mais on la trouve plus au nord, jusqu'en Lorraine où elle semble être à la limite de son aire (Chevalier et Frochot, 1997). Elle mûrit en hiver.

La truffe de Bourgogne (*Tuber uncinatum* Chatin) est la "truffe des rois de France" (Chatin, 1892). Après une période d'oubli, cette truffe, autrefois très appréciée, est à nouveau recherchée et consommée par les connaisseurs. C'est une espèce peu exigeante en chaleur, capable de se développer sur des sols de qualité très inférieure à ceux exigés par la truffe noire, mais qui demande un peu plus d'eau que cette dernière. Elle a une aire de répartition très large, se développant surtout dans la moitié Nord de la France, mais également dans le Centre (Auvergne) et dans une grande partie de l'Europe, sauf dans les régions méditerranéennes. Elle mûrit en automne (Chevalier *et al.*, 1979 ; Chevalier et Frochot, 1997).

Trois autres espèces présentes en conditions naturelles sont également consommées, quoique de manière plus limitée ; elles ne sont pas utilisées pour la production de plants mycorhizés en France ; il s'agit de :

— la truffe brumale ou truffe dite "musquée" (*Tuber brumale* Vitt.) qui est assez commune dans l'aire de la truffe noire, avec laquelle elle est parfois confondue et mélangée, sa récolte s'effectuant également en hiver. Elle est beaucoup moins appréciée que cette dernière et est plutôt considérée comme indésirable dans les truffières de truffe noire. C'est le produit de base des conserves de brisures de truffes.

— la truffe mésentérique (*Tuber mesentericum* Vitt.) qui est une truffe consommée et appréciée dans les régions du Nord-Est de la France où elle se plaît particulièrement. Elle est également présente et appréciée en Italie (truffe d'Avellino, Irpinie, région de Naples), où l'on peut trouver des plants mycorhizés.

— la truffe d'été ou truffe de la Saint-Jean (*Tuber aestivum* Vitt.) se développe en zone méridionale où elle se récolte en été, comme son nom l'indique. Elle ressemble beaucoup à la truffe de Bourgogne mais, à maturité, sa chair est moins foncée et son parfum est moins puissant (Chevalier et Frochot, 1997). Elle n'a pas grand intérêt culinaire mais est vendue sur les marchés du Sud-Est de la France. Une grande partie de la récolte française est mise en conserve et exportée, en particulier vers l'Allemagne.

Enfin, on ne peut passer sous silence des espèces qui se trouvent sur les marchés, en France ou en Italie, ou sur les tables des deux pays :

— la prestigieuse truffe blanche du Piémont (*Tuber magnatum* Pico), très estimée en Italie où elle se développe spontanément. Comme son nom ne l'indique pas, elle est également très abondante dans le Centre-Est de l'Italie (région des Marches). On ne la trouve pas à l'état naturel en France, mais elle donne lieu à la production de plants mycorhizés dans son pays d'origine.

— les truffes chinoises sont des truffes importées d'Asie, notamment *Tuber indicum* Cooke et Massee (littéralement "truffe de l'Inde"), importée du Yunnan et du Sichuan, en Chine. Cette truffe d'hiver a des caractéristiques générales qui la rapprochent de la truffe noire, mais elle n'en a pas la qualité. Ses mycorhizes sont difficiles à différencier de celles de la truffe noire, ce qui fait courir un risque énorme de commercialisation de plants mycorhizés avec cette truffe sur le marché français.

— *Tuber albidum* Pico (= *Tuber borchii* Vitt.), très commune en Italie, moins en France, et *Tuber macrosporium* Vitt., commune en Italie et rare en France, ne sont encore consommées qu'en Italie et ne semblent pas présenter un grand intérêt pour les Français ; pourtant, *Tuber macrosporium* a un parfum et un goût très agréables, qui rappellent ceux de *Tuber magnatum*.

Ces différentes truffes ont chacune leurs exigences écologiques propres, en particulier leurs préférences vis-à-vis de certaines caractéristiques du sol. Elles ont en commun le besoin d'un sol calcaire ou, pour certaines espèces, au moins riche en calcium, pour assurer leur développement.

LA MYCORHIZATION CONTRÔLÉE ADAPTÉE À LA PRODUCTION DE PLANTS MYCORHIZÉS PAR LA TRUFFE

Les principes

La truffe est associée symbiotiquement à une plante-hôte au sein d'un organe appelé "mycorhize". La mycorhize est constituée, d'une part par le mycélium du champignon qui se développe autour de la radicelle de la plante pour constituer une gaine ("manteau" mycélien) et s'insinue également entre les cellules du cortex racinaire pour former le "réseau de Hartig", d'autre part par la racine elle-même. Le mycélium ne pénétrant pas à l'intérieur des cellules de la racine mais restant toujours intercellulaire, les mycorhizes de la truffe sont des "ectomycorhizes". Les hôtes compatibles sont des plantes dites "ectomycorhiziennes", principalement des arbres forestiers, les uns s'associant seulement aux champignons ectomycorhiziens (Chênes, Charmes, Hêtres, Pins...), les autres à la fois ecto- et endomycorhiziens, comme les Peupliers et les Saules, qui peuvent s'associer aux champignons à endomycorhizes à vésicules et arbuscules (endomycorhizes VA). La truffe ne peut pas contracter une association avec des plantes endomycorhiziennes strictes, comme la plupart des arbres fruitiers (genres *Prunus*, *Malus*, *Pyrus*...), certains arbres forestiers (Érables, Frênes, Ormes...) ou ornementaux (Thuyas, Cyprès, *Chamaecyparis*...), la vigne. La majorité des autres champignons ectomycorhiziens sont capables aussi de s'associer aux mêmes plantes-hôtes que la truffe, ce qui en fait des compétiteurs potentiels.

De ces caractéristiques biologiques découlent deux principes fondamentaux de la production de plants mycorhizés par la truffe, et plus tard de la conduite des plantations truffières (Grente, 1972, 1973, 1974) : provoquer la formation des mycorhizes de la truffe sur le maximum d'apex racinaires de la plante-hôte, favoriser le développement des mycorhizes formées en empêchant ou réduisant la colonisation des systèmes racinaires par des champignons mycorhiziens antagonistes. Ces derniers peuvent d'ailleurs être des espèces de truffes autres que celle qui a été inoculée, mais aussi des champignons qui n'ont rien à voir avec les truffes, basidiomycètes comme les hébelomes (*Hebeloma mesophaeum*) ou ascomycètes comme certaines petites pézizes (*Sphaerospora brunnea*), dont la rapidité de croissance mycélienne et le pouvoir de colonisation racinaire sont redoutés dans les serres de préparation des plants mycorhizés par la truffe (Chevalier et Dupré-Rodary, 1990).

La méthode de base

Elle consiste à inoculer la truffe choisie à des graines ou des jeunes plants cultivés depuis l'origine sur un support stérile, puis à faire pousser les plants inoculés sur un substrat de culture désinfecté présentant des propriétés physico-chimiques propices à la mycorhization et à son développement (Mannozi-Torini, 1970). Les plants inoculés sont mis à l'abri des contaminations par des champignons mycorhiziens indésirables pendant toute la durée de l'élevage en serre, c'est-à-dire le temps nécessaire à l'établissement de la mycorhization et de la colonisation du système racinaire de l'hôte par les mycorhizes de la truffe. Ce temps varie d'une espèce de truffe à l'autre. Il faut compter 6-8 mois pour la truffe du Périgord, davantage pour celle de Bourgogne dont la mycorhization est plus aléatoire. Le substrat peut être du sol convenant à la truffe préalablement stérilisé (Chevalier et Grente, 1979) ou des milieux de culture hors-sol (Chevalier, 1984).

L'inoculation

Elle peut se faire de différentes manières.

Le procédé développé en France par l'INRA (Chevalier et Grente, 1979) est le plus utilisé dans le monde pour la production de plants mycorhizés par la truffe. Il a été mis au point au début des années 70, en Italie et en France, à la suite des travaux de l'INPL (Istituto nazionale per le piante da legno) et de l'Université de Turin (Fassi et Fontana, 1967 ; Palenzona, 1969) et de ceux de l'INRA

de Clermont-Ferrand (Chevalier *et al.*, 1973). Il consiste à apporter l'inoculum sous forme de préparations à base de spores de truffes, obtenues par broyage de corps fructifères mûrs, mises au contact des racines de jeunes plantes exemptes de mycorhizes. Cette méthode bien adaptée à la truffe noire et à celle de Bourgogne est utilisée par les producteurs français de plants mycorhizés avec ces deux espèces. Elle est beaucoup plus aléatoire pour la truffe mésoentérique et surtout la truffe blanche du Piémont, dont la germination des spores est plus difficile (Chevalier et Grente, 1979). Cette méthode a fait ses preuves, comme nous le verrons par la suite. Elle peut s'adapter à des plants issus de graines ou à des plants obtenus par multiplication végétative. Elle demande des installations et une main-d'œuvre spécialisées, mais est applicable à grande échelle.

D'autres méthodes apportent l'inoculum avec des racines porteuses de mycorhizes. L'inoculation par contact avec des fragments de racines préalablement mycorhizés par la truffe a été mise au point à l'INRA de Clermont-Ferrand (Chevalier et Grente, 1973). La méthode consiste à prélever des portions de système racinaire sur des "plants-mères" préalablement mycorhizés et à les placer au contact des systèmes racinaires des jeunes plants à inoculer. Cette méthode est le principal mode de production en Italie de plants mycorhizés par la truffe blanche du Piémont. Elle est très fiable, mais présente le risque d'apporter avec la truffe des champignons mycorhiziens indésirables provenant des pieds-mères, car ceux-ci sont difficiles à maintenir longtemps indemnes de contaminations. Le risque de propager un clone de truffe aux performances médiocres est également important. Enfin, la méthode demande des installations plus complexes et une spécialisation plus grande que la méthode par inoculation sporale et exige davantage de contrôle. Une variante est l'inoculation par contact avec des systèmes racinaires non détachés de la plante-mère, utilisée également en Italie pour produire des plants mycorhizés par la truffe blanche du Piémont. Les risques sont les mêmes qu'avec les racines excisées.

Enfin, l'inoculation peut être réalisée directement à partir de cultures mycéliennes de truffe. C'est une méthode déjà ancienne (Fontana et Palenzona, 1969 ; Palenzona *et al.*, 1972 ; Chevalier, 1973). Elle n'a pas été davantage développée, parce que la faible croissance des mycéliums de truffe interdit encore des productions d'inoculum mycélien à grande échelle. Cette méthode est cependant utilisée au laboratoire et est particulièrement bien adaptée à la production de plants *in vitro* (Zambonelli *et al.*, 1989 ; Guinberteau *et al.*, 1990 ; Boutekrab *et al.*, 1990).

Le matériel fongique

Suivant les techniques d'inoculation, le matériel fongique se présente sous différentes formes.

La méthode d'inoculation sporale réalisée à grande échelle nécessite des quantités importantes de truffes pour préparer l'inoculum. Les spores à l'origine de l'association mycorhizienne sont issues d'une population à large base génétique. Il en résulte une grande variabilité dans les écotypes de truffes associés aux plants mycorhizés du commerce réalisés par cette méthode, ce qui leur assure une certaine rusticité et une plus grande capacité à s'adapter à des conditions écologiques variées. Cette méthode permet cependant de sélectionner des provenances de truffes en tenant compte notamment de leur région d'origine et de critères de productivité d'une truffière, mais elle ne permet pas une véritable sélection génétique du matériel truffier.

Les méthodes d'inoculation par cultures mycéliennes permettent, au contraire, de reproduire des clones de truffes, copies strictement conformes aux cultures de référence qui leur ont donné naissance. C'est pourquoi une collection de souches mycéliennes intégrant la variabilité géographique, écologique et génétique a été constituée, à l'INRA de Clermont-Ferrand et de Bordeaux (Chevalier, 1972 ; Poitou *et al.*, 1983 ; Mamoun *et al.*, 1990), en isolant le mycélium à partir de truffes d'origine bien définie provenant de truffières sauvages. La multiplication végétative du champignon, associée à celle de la plante-hôte, a abouti à la production de plants clonés mycorhizés par la truffe. Leur utilisation demandera cependant plusieurs années de vérification et d'expérimentation au champ, avant de pouvoir les commercialiser.

La plante-hôte

Un grand nombre de plantes-hôtes peuvent être inoculées par les différentes truffes, au laboratoire ; ce sont, pour la plupart, des essences forestières (Chevalier, 1976) ; cependant, dans la nature, certaines sont plus aptes que d'autres à produire des truffes. Le choix de l'essence doit en outre être compatible avec les exigences écologiques de l'espèce de truffe choisie. Il fait également intervenir des caractéristiques à prendre en compte dans la culture, comme la sensibilité aux contaminants des racines, l'encombrement du système aérien, la morphologie du système racinaire, la longévité de l'arbre, etc. (Chevalier et Frochot, 1997 ; Olivier *et al.*, 1996).

Les essences choisies pour produire les plants mycorhizés en France sont principalement les Chênes et les Noisetiers, secondairement le Pin noir d'Autriche.

Les Chênes sont de très bons producteurs de truffes dans la nature, particulièrement en région méridionale (Chevalier, 1996). Ils permettent une production durable et semblent moins sensibles aux contaminations que les autres essences en culture (Chevalier, 1994). Le Chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd) est favorable aux différentes espèces de truffes et largement adapté aux conditions écologiques du territoire français. Du fait de ses exigences écologiques, le Chêne vert (*Quercus ilex* L.) est réservé à la culture de la truffe noire en climat méditerranéen où il est, avec le Chêne pubescent, particulièrement bien adapté (Chevalier, 1996). Depuis quelques années, il est abondamment cultivé dans le Sud-Ouest, où il court le risque d'être victime d'un hiver rigoureux.

Les Chênes pédonculé (*Quercus robur* L.) et sessile [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.] sont bien adaptés à la culture de la truffe de Bourgogne en climat plus tempéré (Chevalier et Frochot, 1997), voire à celle de la truffe blanche du Piémont. Une variété de Chêne pédonculé, le "Michelin" (parce qu'il perd ses feuilles à la Saint-Michel) est cultivé dans le Sud-Est pour la production de la truffe noire, mais il est sensible aux gelées printanières et à l'oïdium. Le Chêne chevelu (*Quercus cerris* L.), rare à l'état naturel en France, est expérimenté pour la culture des truffes noire et blanche du Piémont, deux espèces dont il est bon producteur en Italie.

Le Noisetier commun (*Corylus avellana* L.) produit de nombreuses espèces de truffes dans la nature, notamment celle de Bourgogne en climat tempéré (Chevalier *et al.*, 1979 ; Chevalier et Frochot, 1997). Il s'adapte bien à des sols de nature diverse (même s'il préfère les sols profonds et de bonne fertilité) et il s'installe rapidement. Il entre généralement en production plus rapidement que les chênes, les premières truffes pouvant être récoltées au bout de 3 à 4 ans après plantation. La longévité des truffières de noisetiers mycorhizés n'est pas connue. Les premières plantations réalisées en 1973 avec la truffe noire continuent à produire vingt-quatre ans plus tard. Les résultats (pour la truffe noire) sont cependant nettement moins réguliers qu'avec le Chêne pubescent ou le Chêne vert. Le Noisetier, par son système racinaire superficiel à croissance rapide, a tendance à "piéger" des espèces de truffes indésirables ou d'autres champignons ectomycorhiziens ; par ailleurs, en terrain sec, il exerce une concurrence néfaste pour l'eau au détriment des corps fructifères (Chevalier, 1994). Le Noisetier de Byzance (*Corylus colurna* L.) ne semble pas présenter ces inconvénients. Expérimenté dès 1975 par l'INRA de Clermont-Ferrand, il s'est montré bien adapté à la production de la truffe noire comme de celle de Bourgogne.

Le Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* Arn. ssp *nigra*) produit fréquemment et parfois abondamment de la truffe de Bourgogne en milieu naturel, en peuplement pur ou en mélange avec des feuillus. Il peut devenir un très bon producteur en plantation sur sols calcaires. Le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) est également un bon producteur de truffe de Bourgogne, mais son utilisation est réservée aux terrains où la présence de calcaire ne gêne pas son développement.

D'autres essences produisent plus ou moins fréquemment des truffes à l'état naturel, mais ne sont pas développées sous forme de plants mycorhizés, ou alors le sont à très petite échelle. Ce sont notamment les Tilleuls (*Tilia platyphyllos* Scop. et *Tilia cordata* Mill.) utilisables pour les différentes espèces de truffes ; le Hêtre (*Fagus sylvatica* L.), bon producteur de truffe de Bourgogne en Grande-

Bretagne et de truffe mésentérique en Italie ; le Charme blanc (*Carpinus betulus* L.), très bon producteur de truffe de Bourgogne et le Charme noir (*Ostrya carpinifolia* Scop.), adapté aux différentes espèces de truffes ; le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti ex Carrière), bon producteur de truffes de Bourgogne et mésentériques, mais limité vers le nord par sa sensibilité juvénile aux grands froids. Ces essences mériteraient un plus grand développement pour la production de truffes.

Quelques espèces produisent des truffes de façon plus limitée dans la nature : les Cistes (*Cistus* spp.), le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.), le Châtaignier (*Castanea sativa* Mill.), le Bouleau verruqueux (*Betula verrucosa* Ehrh.) ou même l'Épicéa commun [*Picea excelsa* (Lam.) Link.], mais la production reste anecdotique. En revanche, différents Peupliers (*Populus alba* L., *P. nigra* L., *P. tremula* L.) et Saules (*Salix alba* L., *S. capraea* L.) sont utilisés pour la culture de la truffe blanche du Piémont.

Le clonage de la plante-hôte

La plante-hôte peut être reproduite à partir de semis ou par voie végétative (clonage) : bouturage, marcottage, vitropropagation. L'intérêt du clonage est surtout de réduire l'hétérogénéité actuelle des plants qui se traduit par des caractéristiques de forme des arbres, de développement, de sensibilité aux agresseurs... très variables et par une aptitude différente à la mycorhization en relation avec les caractéristiques du système racinaire. Il nécessite une sélection d'hôtes parmi les arbres bien adaptés à l'écologie de la truffe choisie, à la multiplication végétative *in vitro*, à la mycorhization contrôlée, enfin "bons producteurs", lorsque le caractère héréditaire de cette propriété aura été démontré.

Les premiers chênes mycorhizés par la truffe issus de bouturage ont été obtenus à l'INRA de Clermont-Ferrand (Chevalier *et al.*, 1978). Les travaux se sont poursuivis à l'INRA de Bordeaux (Al Kai *et al.*, 1984 ; Guinberteau *et al.*, 1990), avec la multiplication *in vitro* et la mycorhization contrôlée du Noisetier, ainsi qu'à l'Université de Nancy et l'INRA de Clermont-Ferrand, avec celles des Chênes (Favre et Junker, 1986 ; Boutekrabort *et al.*, 1990). Les premiers plants ainsi produits ont été plantés en zone truffière depuis l'hiver 1989-1990. Ils n'ont pas encore produit de truffes. Il faudra observer encore quelques années le comportement de ces plants dans différentes situations avant de pouvoir les commercialiser.

LA MAÎTRISE DE LA MYCORHIZATION EN PLANTATION

Le succès d'une implantation truffière repose sur le maintien de la mycorhization par la truffe et son développement en harmonie avec la croissance du système racinaire de la plante-hôte. La colonisation des racines de l'hôte par la truffe est relativement lente comparée à celle d'autres champignons ectomycorhiziens indésirables. Il faut donc tout mettre en œuvre pour favoriser le développement de la truffe et retarder l'arrivée des compétiteurs. La mycorhization par la truffe peut en effet se maintenir à un niveau élevé, si les conditions sont favorables, ou disparaître totalement dans le cas contraire (Giraud, 1979 ; Chevalier *et al.*, 1982).

La contamination des plantations truffières, même bien mycorhizées par la truffe, semble inévitable au bout d'un certain temps. L'influence de ces contaminations est encore mal connue, mais il semble que certains champignons compétiteurs parmi les plus connus aient cependant une importance assez secondaire, lorsque la truffe est bien installée et que les conditions lui sont favorables ; ainsi des champignons hypogés, tels des hyménogasters ou des sclérodermes, fructifient dans les truffières à côté des truffes sans disparition apparente de celles-ci (Bencivenga *et al.*, 1992), mais l'incidence des différents compétiteurs reste à quantifier.

Le choix de l'antécédent cultural favorable est une phase primordiale (Chevalier *et al.*, 1982 ; Frochot *et al.*, 1990). Les précédents favorables sont les terres occupées depuis longtemps par des cultures

ou des communautés végétales qui ne s'associent pas aux champignons ectomycorhiziens : grandes cultures, prairies, jardins, vergers, vignes, friches à "fruticée" dominées par des espèces de la famille des Rosacées (Prunellier, Rosiers sauvages) et n'hébergeant pas de ligneux hôtes des champignons ectomycorhiziens (Chevalier et Frochot, 1997). Les friches et bois occupés par des essences ectomycorhiziennes sont, au contraire, une source de contamination pour une plantation truffière réalisée même quelques années après le défrichement. Même une mise en culture ou une désinfection puissante du sol sont insuffisantes pour faire disparaître l'inoculum originel (Frochot *et al.*, 1990). Les anciennes truffières peuvent être, bien sûr, favorables du fait de l'enrichissement en spores de "bonnes" truffes, mais il ne faut pas négliger le risque de contamination par d'autres espèces de truffes et par les champignons compétiteurs qui existaient immanquablement dans la truffière.

L'espèce de truffe doit également être bien adaptée aux conditions pédoclimatiques locales. Il est en effet surprenant de constater que les principales contaminations des truffières se font souvent par d'autres espèces de truffes, comme *Tuber brumale* Vitt. (truffe musquée) ou *Tuber rufum* Pico ("nez de chien roux"), les truffes indigènes ayant une forte tendance à remplacer les truffes introduites avec les plants mycorhizés, lorsque celles-ci ne sont pas parfaitement à leur place.

Un facteur important du maintien de la mycorhization est l'utilisation de plants abondamment mycorhizés par la truffe. C'est particulièrement important lorsque l'antécédent comporte un potentiel d'inoculum de champignons compétiteurs élevé (Chevalier et Dupré, 1990). Dans ce cas, il est en outre recommandé de choisir des essences truffières à croissance lente, comme les Chênes vert (si le climat le permet) ou pubescent, plutôt que le Noisetier et surtout le Charme noir dont les systèmes racinaires "piègent" plus facilement les mycorhizes étrangères (Bencivenga et Granetti, 1990).

Les techniques culturales consistent surtout à favoriser l'installation des arbres mycorhizés par la truffe par désherbage et travail du sol à proximité des plants. L'aération du sol est fortement recommandée pour un bon développement des mycorhizes de truffe. Cependant, il peut être utile de freiner une croissance trop rapide des arbres comme les Noisetiers, en cas de risques élevés de contamination par des champignons préexistants. Dans ce cas, le maintien momentané d'un enherbement entre les lignes de plants peut s'avérer efficace ; par ailleurs, les conditions de milieu doivent être adaptées à l'espèce de truffe introduite, la truffe noire exigeant un éclaircissement important et celle de Bourgogne un minimum d'ombre. Ces exigences doivent être satisfaites par la gestion de la densité de plantation et la taille des arbres ; enfin, des techniques comme l'apport de calcaire permettraient, dans certains cas, de faire régresser des champignons compétiteurs comme la truffe brumale.

LES RÉSULTATS

Depuis 1973, plus d'un million de plants mycorhizés selon le procédé INRA ont été mis en place pour constituer des truffières. Les premiers plants ont commencé à "brûler", c'est-à-dire à provoquer un dessèchement de la végétation autour du plant, attribuable à l'effet herbicide de l'appareil végétatif de la truffe, deux ans après plantation. Les premières truffes ont été récoltées trois ans et demi après plantation sous des noisetiers mycorhizés par la truffe noire installés en Bourgogne (Chevalier, 1983). Par la suite, de nombreux exemples ont montré l'efficacité de la méthode de mycorhization contrôlée et la relation étroite qui existe entre la qualité du plant mycorhizé, en terme de degré de mycorhization par la truffe inoculée, et l'entrée en production rapide et durable de la truffière, chaque fois que les conditions de milieu sont favorables.

L'entrée en production d'une plantation est cependant toujours progressive, le taux d'arbres producteurs augmentant d'année en année ; par exemple, dans la truffière de Dordogne qui a servi de référence pour la définition de la "méthode Pallier" de trufficulture (culture d'arbres truffiers préala-

blement mycorhizés à la manière d'un verger truffier) (Sourzat, 1995), la proportion d'arbres producteurs est passée de 2,5 %, après quatre années de végétation, à 59 %, après 11 années (Chevalier, 1994). Il semble qu'une période de 10 à 15 années soit le temps généralement nécessaire à une bonne expression des arbres producteurs. Dans le cas exceptionnel d'une truffière installée en Côte-d'Or, la proportion d'arbres producteurs atteignait 73 %, quatre ans après plantation (Chevalier, 1983) et 80 %, au bout de dix années.

Il est difficile de se faire une idée exacte du pourcentage d'arbres producteurs à l'échelon national. Les résultats d'enquêtes sur la production de truffes dont les chiffres réels échappent à toute statistique ne peuvent qu'être douteux.

Un état des lieux réalisé il y aura bientôt 10 ans (Le Tacon *et al.*, 1988) donnait déjà des chiffres de production de plants mycorhizés. Dans une truffière expérimentale de la Meuse, 13 ans après plantation, 43 % des plants inoculés avec *Tuber melanosporum* étaient producteurs, 77 % des plants inoculés avec *Tuber uncinatum* et 42 % des plants inoculés avec *Tuber mesentericum*. Les résultats actuels confirment largement les conclusions optimistes que tiraient les auteurs de ces expérimentations.

Le rendement est assez difficile à quantifier du fait de la discrétion généralement observée par les producteurs de truffes sur ce point, mais aussi du fait de l'irrégularité de la production d'une année sur l'autre et d'une plantation à l'autre : l'âge de la plantation, les conditions climatiques de l'année et les caractéristiques de la plantation interfèrent fortement dans la production. Cependant, des exemples précis connus donnent une idée des quantités qu'on est en droit d'attendre. Avec des rendements moyens d'une trentaine de kg à l'hectare, à partir d'un âge de 10-13 ans (50 kg à 13-16 ans), les résultats obtenus dans la plantation de Dordogne citée précédemment, plantation bien conduite réalisée avec des plants mycorhizés par la truffe noire selon le procédé INRA, sont satisfaisants. Une variation entre 30 et 50 kg selon les années est probablement attribuable à l'âge des plants et à l'irrigation qui compense les déficits hydriques estivaux. Sourzat cite, pour les plantations conduites selon la "méthode Pallier", des rendements qui varient "raisonnablement" entre 15 et 30 kg à l'hectare, 15 et 20 ans après plantation. Suite à l'expérimentation menée dans la Meuse et citée plus haut, Le Tacon *et al.* estiment qu'une plantation de Noisetiers mycorhizés est en mesure de produire 20 à 50 kg de truffes (*Tuber melanosporum*) par hectare et par an, à 10 ans, si elle est correctement entretenue et irriguée pendant la saison sèche.

De telles productions doivent être considérées comme correctes, mais elles peuvent être dépassées. Il existe, en effet, des cas exceptionnels comme la truffière de Côte-d'Or déjà citée qui a produit 20 kg/ha de truffe noire quatre ans après plantation et 110 kg/ha à 14 ans, mais avec une variabilité annuelle importante. Durant la saison 1993-1994, dans le Périgord, trois truffières cultivées selon la "méthode Tanguy" ou de "gestion d'un espace truffier" (truffière enherbée entretenue par tonte de la végétation) (Sourzat, 1995) se sont signalées par des productions de 100 kg/ha à 11 ans de plantation pour l'une, et de plus de 150 kg/ha à 13 ans de plantation pour les deux autres (Chevalier, 1994).

CONCLUSIONS

La maîtrise de la culture des truffes passe par la mycorhization contrôlée. Cette dernière ne se réduit pas à la réalisation de l'association symbiotique entre l'arbre et le champignon par le pépiniériste, mais prend en compte le développement de cette association, qui est du ressort du planteur (Olivier, 1997). Pour ce qui est de la réalisation de l'association, le procédé développé par l'INRA a fait ses preuves. Il a permis de mettre sur le marché français, depuis 1973, des quantités importantes de plants mycorhizés par la truffe noire, et plus récemment des plants mycorhizés par la truffe de Bourgogne. Le plant mycorhizé, même produit par les méthodes classiques (semis et inoculation sporale), s'est avéré un outil extrêmement performant lorsque, par ailleurs, les conditions pédoclimatiques et les façons culturales étaient satisfaisantes.

Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production des champignons comestibles

L'utilisation des plants mycorhizés par l'une ou l'autre de ces deux espèces, écologiquement et commercialement complémentaires, permet maintenant la culture de la truffe dans tout l'hexagone : la truffe de Bourgogne à préférence septentrionale est présente sur les marchés truffiers du centre au nord de la France dès l'automne, tandis que la truffe noire, à préférence méditerranéenne, prend la suite des marchés truffiers méridionaux durant tout l'hiver.

L'avènement du plant mycorhizé durant ces vingt-cinq dernières années a été, à notre avis, le principal facteur du progrès de la trufficulture en Europe. Malheureusement, les pratiques culturales n'ont pas suivi, et l'on en est encore à se poser des questions sur le bien-fondé de certaines pratiques, comme le maintien du sol nu ou l'enherbement des truffières (méthodes "Pallier" et "Tanguy") (Olivier *et al.*, 1996). La fertilisation des truffières en cours de production n'est pas au point. L'irrigation n'a pas toujours donné les résultats escomptés et l'on a vu les truffes devenir de plus en plus petites. Une nette amélioration des méthodes de culture actuelles permettrait de mieux maîtriser la production de nos deux espèces de truffes cultivées en France, avec une marge d'incertitude raisonnable. Des progrès sont encore attendus sur la qualité des plants mycorhizés, dont le clonage pourrait réduire sérieusement la variabilité, sur les modes de conduite des plantations qui demandent encore beaucoup d'expérimentations et sur les connaissances biologiques concernant la truffe dont on ne sait pas seulement comment naissent les corps fructifères.

Malgré les progrès réalisés, la progression de la production est lente et insuffisante face à la demande française et étrangère. Des développements nouveaux pourraient permettre une extension plus rapide des zones productrices en introduisant des modèles encore peu utilisés comme la constitution de pare-feu ou de brise-vent producteurs de truffe noire en région méditerranéenne ou celle de haies à truffe de Bourgogne en région tempérée. On pourrait aussi associer la trufficulture et la sylviculture en constituant des boisements à partir de plants mycorhizés avec la truffe de Bourgogne habituée à se développer en milieu forestier. Ceux-ci pourraient être réalisés avec un maximum de chances de succès sur des terres agricoles, situées en zones calcaires favorables. Des plantations forestières pourraient s'envisager directement à partir d'essences-objectif mycorhizées, comme le Hêtre, le Cèdre ou le Pin noir d'Autriche associé à la truffe de Bourgogne, le Pin d'Alep associé à la truffe noire. Des espèces comme le Noisetier ou le Charme noir mycorhizés par la truffe de Bourgogne pourraient aussi accompagner des feuillus précieux endomycorhiziens comme le Merisier ou le Noyer (Chevalier et Frochot, 1997).

Enfin, il est souhaitable que les planteurs potentiels disposent d'une gamme d'essences truffières beaucoup plus large que la gamme actuelle (Chênes et Noisetiers) et que la production de plants truffiers ne s'arrête pas aux seules espèces de truffes commercialisées actuellement en France.

L'association de la trufficulture et de la sylviculture pourrait constituer une solution intéressante pour l'obtention d'un produit de grande valeur commerciale, la production de bois, la lutte contre l'érosion, la lutte contre les incendies de forêt, la mise en valeur de zones marginales, la restauration des paysages. La trufficulture-sylviculture n'est pas incompatible non plus avec une activité pastorale, si elle n'est pas trop accentuée, ni avec des activités cynégétiques. Ce type de trufficulture, très développé en Italie, demanderait à être encouragé en France.

G. CHEVALIER
Unité de Mycologie
INRA - Centre de Recherche de Clermont-Theix
234, avenue du Brézet
F-63039 CLERMONT-FERRAND CEDEX

H. FROCHOT
Unité Croissance, Production et Qualité des Bois
INRA - Centre de Recherches de Nancy
F-54280 CHAMPENOUX



Photos G. CHEVALIER



Photo 1
Mycorhizes de *Tuber melanosporum* sur Noisetier.

Photo 2
Corps fructifères de *Tuber melanosporum* Vitt. (truffe dite du Périgord).

Photo 3
Mycorhizes de *Tuber uncinatum* sur Noisetier. Le mycélium qui émane des mycorhizes est très abondant.

Photo 4
Corps fructifères de *Tuber uncinatum* Chatin (truffe dite de Bourgogne).

Photo 5
Chien truffier en train d'extraire un corps fructifère de *Tuber melanosporum* sous un Noisetier de Byzance (*C. colurna*) (plantation expérimentale de l'INRA - Clermont-Ferrand).



Photo 6
Truffière naturelle à *Tuber uncinatum* dans un bois de Charme (*Carpinus betulus*).



Photo 7
Truffière naturelle sous Chêne, en bordure de champ. Les truffes se développent en rond matérialisé par les morceaux de papier blanc. Région de Commercy dans la Meuse.



Photo 8
Plantation de Noisetiers mycorrhizés par *Tuber melanosporum* en production (Daix, Côte-d'Or)



Photo 9
Plantation de Chênes mycorrhizés par *Tuber melanosporum* en production (Carpentras, Vaucluse).

Photos G. CHEVALIER

BIBLIOGRAPHIE

- AL KAI (H.), SALESSES (G.), MOURAS (A.). — Multiplication *in vitro* du Noisetier (*Corylus avellana*). — *Agronomie*, vol. 4, n° 4, 1984, pp. 399-402.
- BENCIVENGA (M.), DONNINI (D.), DI MASSIMO (G.). — Analisi delle micorrize in una tartufoia coltivata di *Tuber melanosporum* undici anni dopo l'impianto. — *Micol. e Veg. Medit.*, vol. 7, n° 1, 1992, pp. 159-171.
- BENCIVENGA (M.), GRANETTI (B.). — Risultati produttivi di tartufoie coltivate di *T. melanosporum* Vitt. in Umbria. In : Comptes rendus du 2^e Congrès international sur la truffe, Spoleto, 24-28 nov. 1988 / B. Granetti, M. Bencivenega Eds. — 1990, pp. 313-322.
- BOUTEKRABT (A.), CHEVALIER (G.), PARGNEY (J.C.), DEXHEIMER (J.). — Mycorhization par *T. melanosporum* Vitt. de vitroplants de *Quercus robur* L. et *Q. pubescens* Willd. — *Agronomie*, vol. 10, n° 2, 1990, pp. 127-132.
- CHATIN (A.D.). — La Truffe et sa culture. — Paris : Ed. J.P. Baillièrre, 1892.
- CHEVALIER (G.). — Application pratique de la symbiose ectomycorhizienne. In : Comptes rendus du Séminaire du Groupe d'études des racines, Grenoble / A. Riedacker et J. Gagnaire-Michard Eds. — vol. 5, 1976, pp. 55-82.
- CHEVALIER (G.). — Le Chêne blanc et le Chêne vert, essences truffières par excellence. — *Forêt méditerranéenne*, vol. 17, n° 3, 1996, pp. 235-242.
- CHEVALIER (G.). — Évolution des recherches sur les plants mycorhizés par la truffe et perspectives de développement. — *Giornale botanico italiano*, vol. 128, n° 1, 1994, pp. 7-18.
- CHEVALIER (G.). — Obtention de cultures de mycélium de truffe, à partir du carpophore et des mycorhizes. — *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 12, 1972, pp. 981-989.
- CHEVALIER (G.). — Production de truffes à partir de plants mycorhizés selon le procédé INRA : premiers résultats. — *Bulletin FNPT*, vol. 6, 1983, pp. 33-50.
- CHEVALIER (G.). — Synthèse axénique des mycorhizes de *T. brumale* Vitt. à partir de cultures pures du champignon. — *Ann. Phytopath.*, vol. 5, n° 2, 1973, pp. 163-182.
- CHEVALIER (G.). — Une nouvelle méthode de production de plants mycorhizés par la truffe : l'inoculation en motte roulée Melfert. — *Agronomie*, vol. 4, n° 2, 1984, p. 211.
- CHEVALIER (G.), DESMAS-RODARY (C.), FROCHOT (H.), RIOUSSET (L.). — L'Espèce *Tuber aestivum* Vitt. II. Ecologie. — *Mushroom Sc.*, vol. 10, n° 1, 1979, pp. 977-993.
- CHEVALIER (G.), DUPRÉ-RODARY (C.). — Recherche et expérimentation sur la truffe et la trufficulture en France. In : Comptes rendus du 2^e Congrès international sur la truffe, Spoleto, 24-28 nov. 1988 / B. Granetti, M. Bencivenega Eds. — 1990, pp. 157-166.
- CHEVALIER (G.), FROCHOT (H.). — La Truffe de Bourgogne. — Paris : Ed. Pétrarque, 1997.
- CHEVALIER (G.), GIRAUD (M.), BARDET (M.-C.). — Interactions entre les mycorhizes de *T. melanosporum* et celles d'autres champignons ectomycorhiziens en sols favorables à la truffe. In : V. Gianinazzi, S. Gianinazzi Eds. — Paris : INRA, 1982. — pp. 313-321 (Les Colloques de l'INRA ; vol. 13).
- CHEVALIER (G.), GRENTE (J.). — Application pratique de la symbiose ectomycorhizienne : production à grande échelle de plants mycorhizés par la truffe. — *Mushroom Sc.*, vol. 10, n° 2, 1979, pp. 483-505.
- CHEVALIER (G.), GRENTE (J.). — Propagation de la mycorhization par la truffe à partir de racines excisées et de plants inséminateurs. — *Ann. Phytopath.*, vol. 5, 1973, pp. 317-318.
- CHEVALIER (G.), GRENTE (J.), GARBAYE (J.), FERRAPY (I.), DESMAS-RODARY (C.). — Mycorhization par la truffe (*Tuber melanosporum* Vitt.) de boutures racinées de Chêne rouvre [*Quercus petraea* Matt. (Liebl.)]. — Comptes rendus du Congrès IUFRO, Nancy, 1978.
- CHEVALIER (G.), GRENTE (J.), POLLACSEK (A.). — Obtention de mycorhizes de différents *Tuber* par synthèse à partir de spores en conditions gnotoxéniques et à partir de cultures pures du mycélium en conditions axéniques et gnotoxéniques. — *Ann. Phytopath.*, vol. 5, n° 1, 1973, pp. 107-108.
- CHEVALIER (G.), RIOUSSET (L.), RIOUSSET (G.), DUPRÉ (C.). — Taxonomie des truffes européennes. In : Comptes rendus du 2^e Congrès international sur la truffe, Spoleto, 24-28 nov. 1988 / B. Granetti, M. Bencivenega Eds. — 1990, pp. 37-44.
- FASSI (B.), FONTANA (A.). — Sintesi micorrizica tra *Pinus strobus* e *Tuber maculatum*. I. Micorrize e sviluppo dei semenzali nel secondo anno. — *Allionia*, vol. 13, 1967, pp. 177-186.
- FAVRE (J.-M.), JUNCKER (B.). — *In vitro* growth of buds taken from seedlings and adult plants material in *Quercus robur* L. — *Plant cell, tissue organ cult.*, vol. 8, 1986, pp. 49-60.
- FONTANA (A.), PALENZONA (M.). — Sintesi micorrizica di *Tuber albidum* in coltura pura, con *Pinus strobus* e pioppo euamericano. — *Allionia*, vol. 15, 1969, pp. 99-104.
- FROCHOT (H.), CHEVALIER (G.), BARDET (M.-C.). — Influence de la désinfection du sol et du précédent cultural sur le devenir de la mycorhization par *Tuber melanosporum* après plantation. In : Comptes rendus du 2^e Congrès international sur la truffe, Spoleto, 24-28 nov. 1988 / B. Granetti, M. Bencivenega Eds. — 1990, pp. 289-296.
- GIRAUD (M.). — Étude comparative des mycorhizes d'arbres producteurs de truffes ou non en zone truffière. — Rennes : ENSA, 1979. — 56 p. (Mémoire de fin d'études. Diplôme d'Agronomie approfondie).
- GRENTE (J.). — Perspectives pour une trufficulture moderne. — Clermont-Ferrand : INRA, 1972-73-74. — 65 p.
- GUINBERTEAU (J.), SALESSES (G.), OLIVIER (J.-M.), POITOU (N.). — Mycorhization de vitroplants de noisetiers clonés. In : Comptes rendus du 2^e Congrès international sur la truffe, Spoleto, 24-28 nov. 1988 / B. Granetti, M. Bencivenega Eds. — 1990, pp. 205-210.

Les possibilités d'application en vue de l'amélioration de la production des champignons comestibles

- LE TACON (F.), GARBAYE (J.), BOUCHARD (D.), CHEVALIER (G.), OLIVIER (J.-M.), GUINBERTEAU (J.), POITOU (N.), FROCHOT (H.). — Field results from mycorrhizal inoculation in France. *In* : Canadian Workshop on Mycorrhizae in Forestry, 1-4 mai 1988 / M. Lalonde, Y. Piché Eds. — Québec : Université Laval, 1988. — pp 51-74.
- MAMOUN (M.), OLIVIER (J.-M.), GUINBERTEAU (J.). — Milieux de culture et croissance mycélienne de la truffe. *In* : Comptes rendus du 2^e Congrès international sur la truffe, Spoleto, 24-28 nov. 1988 / B. Granetti, M. Bencivenga Eds. — 1990, pp. 167-171.
- MANNOZZI-TORINI (L.). — Manuale di tartuficoltura. — Bologna : Edagricole, 1970.
- OLIVIER (J.-M.). — La Mycorrhization contrôlée, application à d'autres champignons comestibles que les truffes. *In* : Comptes rendus de la Journée rencontre 25^e anniversaire de la Société Agri-truffe, Saint-Maixant, 27 juin 1997. — 1997.
- OLIVIER (J.-M.), SAVIGNAC (J.-C.), SOURZAT (P.). — Truffe et trufficulture. — Périgueux : Ed. Fanlac, 1996.
- PALENZONA (M.). — Sintesi micorrizica tra *Tuber aestivum* Vitt., *T. brumale* Vitt., *T. melanosporum* Vitt. e semenzali di *Corylus avellana* L. — *Allionia*, vol. 15, 1969, pp. 121-131.
- PALENZONA (M.), FONTANA (A.), CHEVALIER (G.). — Sintesi micorrizica tra *Tuber brumale* Vitt., *T. melanosporum* Vitt., *T. rufum* Pico in colture di micelio e semenzali di conifere e latifoglie. — *Allionia*, vol. 18, 1972, pp. 41-52.
- POITOU (N.), VILLENAVE (P.), BAUDET (P.), DELMAS (J.). — Croissance *in vitro* du mycélium de *Tuber melanosporum* Vitt. et de certains compétiteurs en fonction du pH du milieu. — *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 6, n° 16, 1983, pp. 1363-1370.
- SOURZAT (P.). — Guide pratique de trufficulture. — Cahors : LEPA du Montat, 1995.
- ZAMBONELLI (A.), GOVI (G.), PREVIATI (A.). — Micorizzazione *in vitro* di piantine micropropagate di *Populus alba* con micelio di *Tuber albidum* in coltura pura. — *Mic. Ital.*, vol. 3, 1989, pp. 105-111.

LA MAÎTRISE DE LA CULTURE DE LA TRUFFE (Résumé)

La culture de la truffe concerne essentiellement deux truffes en France : la truffe noire du Périgord (*Tuber melanosporum* Vitt.) et la truffe de Bourgogne (*T. uncinatum* Chatin). Ces deux truffes font partie des 9 espèces autorisées à la vente à l'état frais, dont 7 se trouvent à l'état spontané en France, les deux autres respectivement en Italie (*Tuber magnatum* Pico, truffe blanche du Piémont) et en Chine (*Tuber indicum* Cooke et Masee, truffe de Chine). La truffe est associée symbiotiquement à une plante-hôte par des ectomycorhizes. La maîtrise de la culture de la truffe repose sur deux principes :

— L'utilisation de plants "truffiers" fiables, c'est-à-dire correctement mycorhizés par la truffe. Avec la collaboration de chercheurs italiens, l'INRA a mis au point des méthodes de mycorrhization contrôlée permettant la production de ces plants à grande échelle.

— Le respect des exigences écologiques de l'espèce de truffe choisie et la réduction des risques de contamination par les champignons potentiellement compétiteurs de la truffe, grâce à un choix raisonné des conditions de milieu, des antécédents, de l'arbre-hôte, et des pratiques culturales appropriées : densités de plantation, modes de conduite du couvert et d'entretien du sol, irrigation.

Un recul de plus de 20 ans montre que l'application de ces méthodes permet des résultats indiscutables dans les plantations, même si la maîtrise de la production peut encore être améliorée.

TRUFFLE CULTIVATION TECHNIQUES (Abstract)

Truffle cultivation in France involves essentially two species of truffle — the black Perigord truffle (*Tuber melanosporum* Vitt.) and the Burgundy truffle (*Tuber uncinatum* Chatin). These are among the nine species the sale of which is permitted in the fresh state, seven of which are native to France and the other two respectively to Italy (*Tuber magnatum* Pico - the white Piemonte truffle) and China (*Tuber indicum* Cooke and Masee - the Chinese truffle). Truffles and their host plants are in a symbiotic association mediated by ectomycorrhizae. Truffle cultivation is based on two principles:

— the use of reliable "truffle-producing" plants, i.e., ones that are adequately inoculated by truffle. In cooperation with Italian researchers, INRA has developed methods of controlled mycorrhization for large-scale production of such hosts.

— compliance with the ecological requirements of the chosen truffle species and abatement of the risks of contamination by potential fungal competitors of truffle by careful selection of environment, cropping history, host tree species and appropriate tilling techniques — planting densities, soil maintenance and vegetation cover management, irrigation).

More than 20 years of experience show that the application of these methods is unquestionably effective in plantations although management techniques for production could still be improved.